

Cours Réseaux

Chapitre 5 La couche liaison

Université de Perpignan

Chapter 5: La couche liaison

Buts:

Comprendre les principes de la couche liaison:

- Détection et correction d'erreur
 - Partage du canal de diffusion: accès multiple
 - adressage de la couche liaison
 - transfert de données fiable, contrôle de flux.
- instantiation et implémentation de plusieurs technologies de la couche liaison

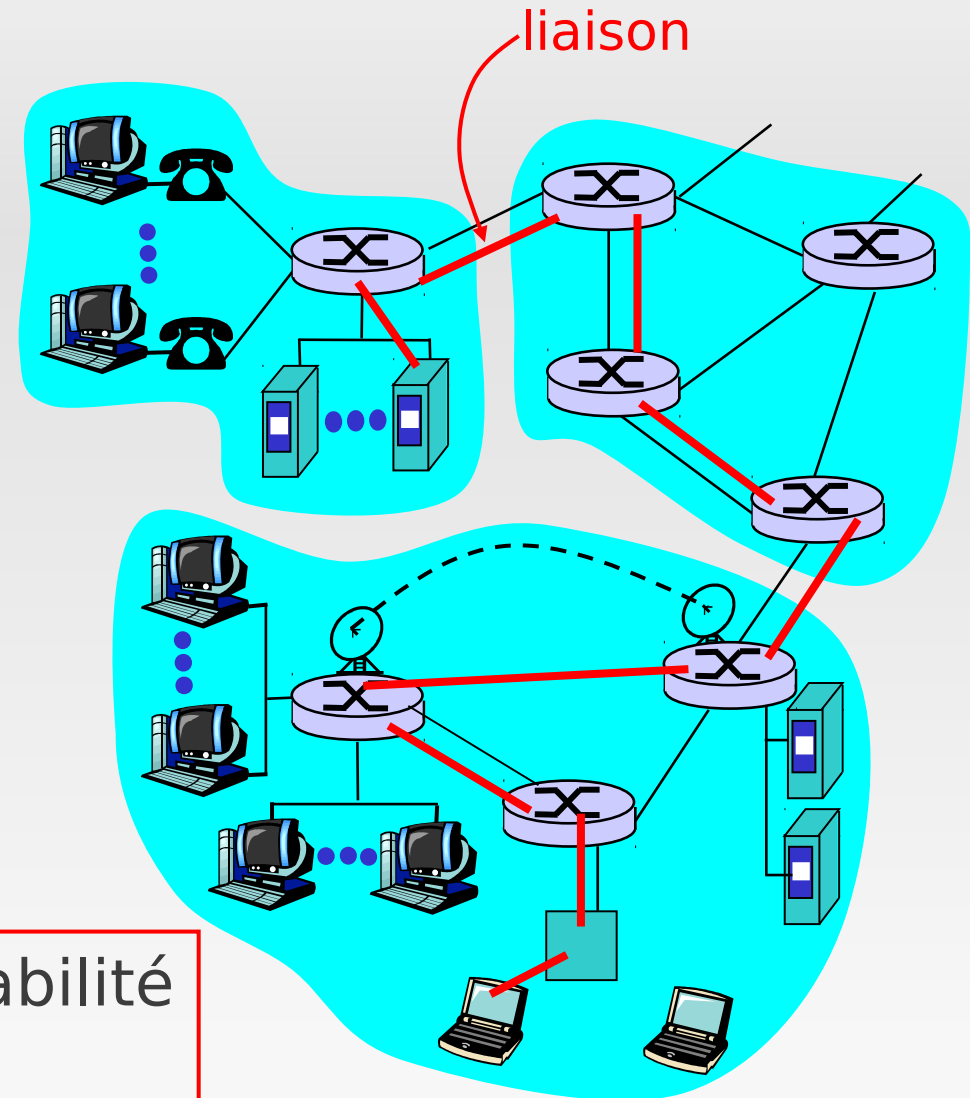
Chapitre 5: La couche liaison

- 5.1 Introduction et services
- 5.2 Détection d'erreur et correction
- 5.3 Protocole d'accès multiple
- 5.4 Adressage de la couche liaison
- 5.5 Ethernet
 - Ethernet
 - Hubs et switches
- 5.6 Wifi
 - Liaison sans fil caractéristique
 - CDMA
 - IEEE 802.11 réseaux locaux (LANs) sans fil (“wi-fi”)
 - Accès internet pour les cellulaires
 - architecture
 - standards (e.g., GSM)
- 5.7 Liaison point à point (PPP)

Couche liaison: Introduction

Quelques terminologies:

- hôtes et routeurs sont des noeuds
- Canaux de communication qui connecte des noeuds adjacents le long du chemin de communication sont des liaisons
 - Liaisons cablés
 - Liaisons sans fils
 - LANs
- Le nom du paquet de la couche liaison est la **trame**, qui encapsule le datagramme de la couche réseau



La couche liaison a la responsabilité de transférer des datagrammes d'un noeud à un noeud adjacent sur une liaison

Couche liaison: contexte

- Un datagramme est transféré par différents protocoles de la couche liaison sur différentes liaisons:
 - e.g., Ethernet sur la première liaison, *frame relay* sur les liaisons intermédiaires, 802.11 sur la dernière liaison
- Chaque protocole de la couche liaison offre différents services
 - e.g., offre ou pas un rdt (transfert de donnée fiable) sur la liaison.

Analogie avec le transport

- Voyage de Princeton à Lausanne
 - limo: de Princeton à JFK
 - avion: de JFK à Genève
 - train: de Genève à Lausanne
- touriste = **datagramme**
- Segment de transport = **liaison de communication**
- Mode de transport = **protocole de la couche liaison**
- Agent de voyage = **algorithme de routage**

Couche liaison: services

- **Tramage, accès à la liaison:**
 - Encapsule un datagramme dans une trame, ajoute une entête, et un marqueur de fin de trame
 - Accès au canal si le support physique est partagé
 - Adresses “MAC” utilisées dans les entêtes des trames pour identifier la source et le destinataire
 - Différentes des adresses IP!
- **Transfert fiable**
 - Nous savons déjà faire ça (Chapitre 3)!
 - Rarement utilisé sur des supports fiables (fibre optique, certaines paires torsadées)
 - Liaison sans fil : taux d'erreur important
 - Q: Pourquoi à la fois une fiabilité au niveau liaison et une fiabilité de bout en bout?

Couche liaison: services (suite)

- *Contrôle de flux:*
 - Entente sur le flux entre un noeud expéditeur et un noeud destinataire adjacent
- *Détection d'erreur:*
 - Erreurs causées par une atténuation du signal ou du bruit.
 - Le destinataire détecte la présence d'erreurs:
 - Avertit l'expéditeur pour qu'il le retransmette ou rejette la trame.
- *Correction d'erreur:*
 - Le destinataire identifie *et corrige* des bits erronés sans avoir besoin d'une retransmission
- *Semi-duplex et duplex-total*
 - Avec une liaison en semi-duplex, les noeuds aux deux bouts du lien peuvent transmettre mais pas en même temps

Adapateurs Communicants



- La couche réseau est implantée dans un “adaptateur” (aussi connu comme **NIC**)
 - Carte Ethernet, carte PCMCIA, carte 802.11
- Côte expéditeur:
 - Encapsule le datagramme dans une trame
 - Ajoute des bits de détection d'erreur, rdt, contrôle de flux, etc.
- Côte destinataire
 - Cherche des erreurs, rdt, contrôle de flux, etc
 - Extrait le datagramme, et le passe au noeud destinataire
- L'adaptateur est semi-autonome
- Liaison & couche physique

Chapitre 5: La couche liaison

- 5.1 Introduction et services
- 5.2 Détection d'erreur et correction
- 5.3 Protocole d'accès multiple
- 5.4 Adressage de la couche liaison
- 5.5 Ethernet
 - Ethernet
 - Hubs et switches
- 5.6 Wifi
 - Liaison sans fil caractéristique
 - CDMA
 - IEEE 802.11 réseaux locaux (LANs) sans fil (“wi-fi”)
 - Accès internet pour les cellulaires
 - architecture
 - standards (e.g., GSM)
- 5.7 Liaison point à point (PPP)

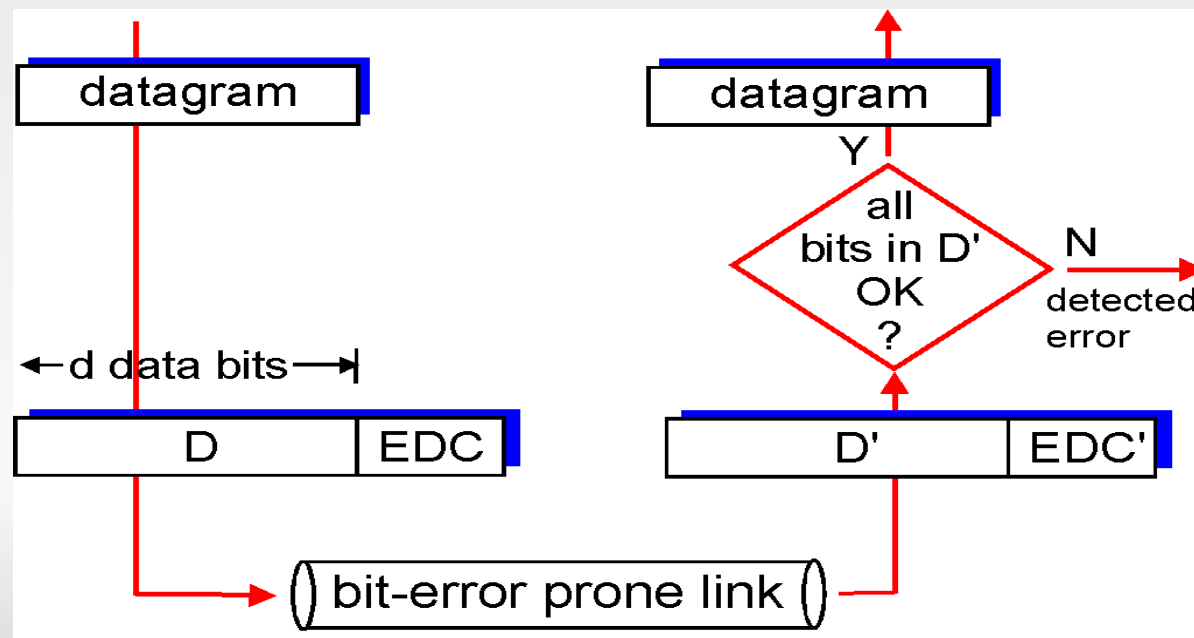
Détection d'erreur

EDC= bits d'Erreur Detection et de Correction (redondance)

D = Donnée protégée par la détection d'erreur, peut inclure les champs d'entête

La détection d'erreur n'est pas a 100% sûre!

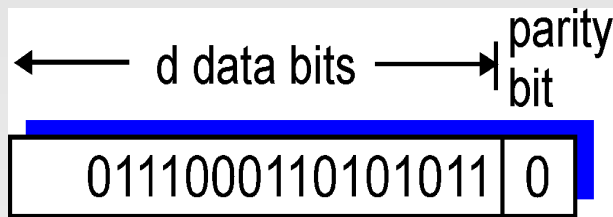
- Le protocole peut ne pas détecter certaines erreurs, mais rarement
- Un champs EDC permet en général une meilleure détection et une meilleure correction



Détection par bits de parité

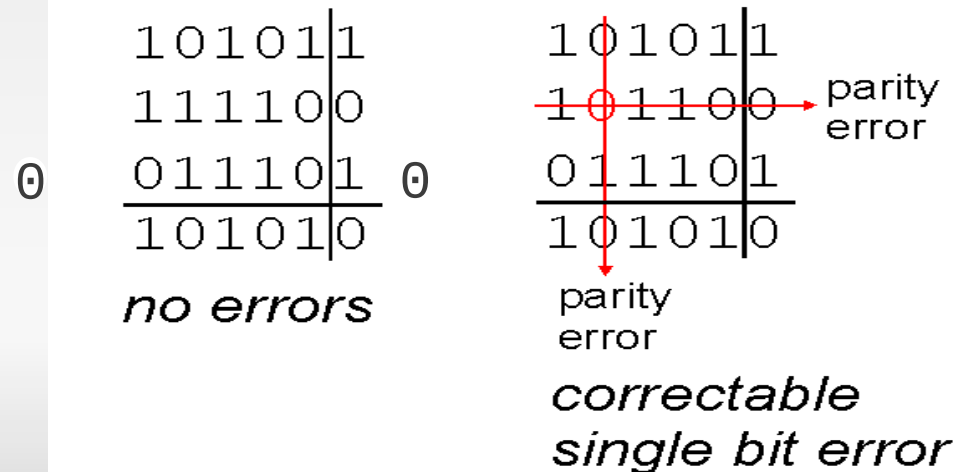
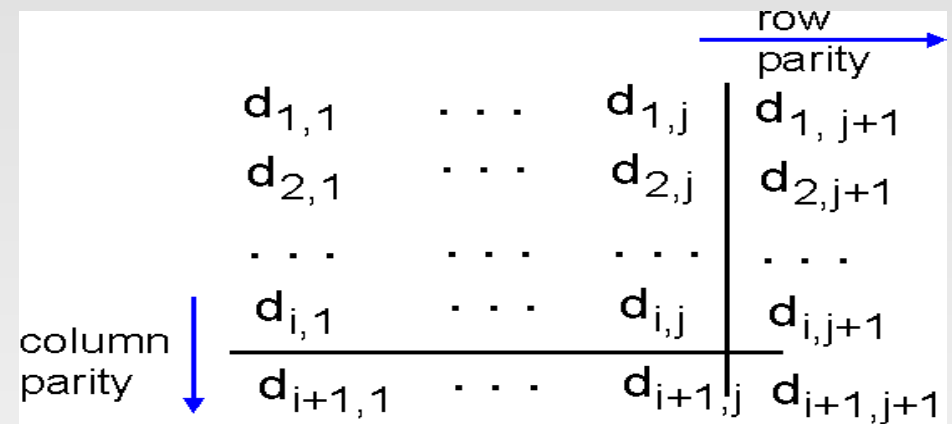
Simple bit de parité:

Détecter un simple bit d'erreurs



Bits de parité bidimensionnel:

Détecte *et corrige* un bit d'erreurs



Somme de contrôle d'internet

But: détecter des “erreurs” (e.g., bits inversés) dans les segments transmis (notons qu'on l'utilise *uniquement* dans la couche transport)

Expéditeur:

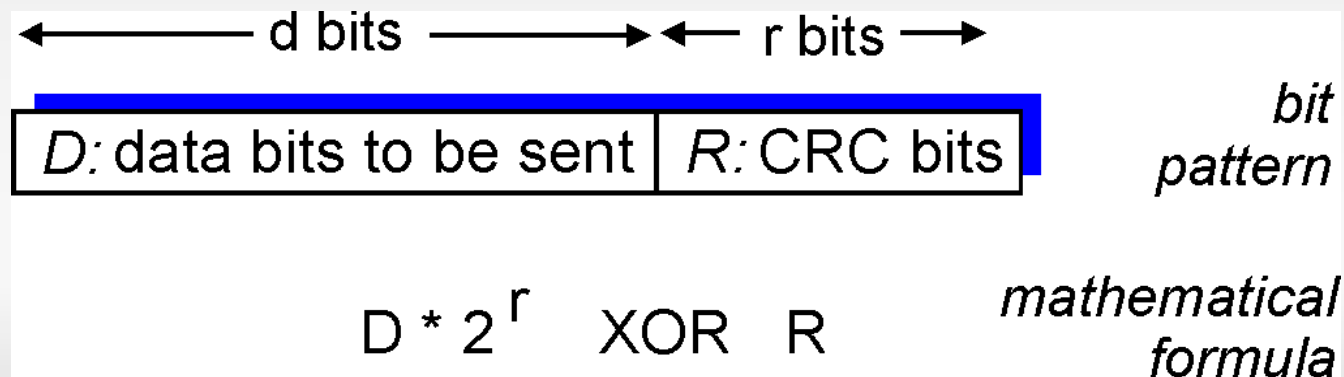
- Traite du contenu des segments comme des séquences d'entier de 16-bits.
- Somme de contrôle: addition (somme complémentée à 1) du contenu des segments.
- L'expéditeur met la valeur de somme de contrôle dans le champs “somme de contrôle” UDP.

Destinataire:

- Calcule la somme de contrôle du segment reçu
- Vérifie si la valeur calculée est égal à la valeur dans le champs “somme de contrôle”:
 - NON – une erreur est détectée
 - OUI – pas d'erreur détectée. Mais *peut-être y a t il des erreurs tout de même?* cf. Plus tard ...

Somme de contrôle: Cyclic Redundancy Check (CRC)

- Les bits de données, D , sont vus comme un nombre (polynôme) binaire
- Choisir un motif de longueur $r+1$ (polynôme générateur), G
- But : choisir r bits CRC, R , tels que
 - $\langle D, R \rangle$ vu comme un polynôme soit exactement divisible par G (modulo 2)
 - Le destinataire connaît G , divise $\langle D, R \rangle$ par G . Si le reste est non-nul alors une erreur est détectée !
 - Peut détecter toute les erreurs inférieures à $r+1$ bits
- Très répandue (ATM, HDCL)



CRC: Exemple

On veut :

$$D \cdot 2^r \text{ XOR } R = nG$$

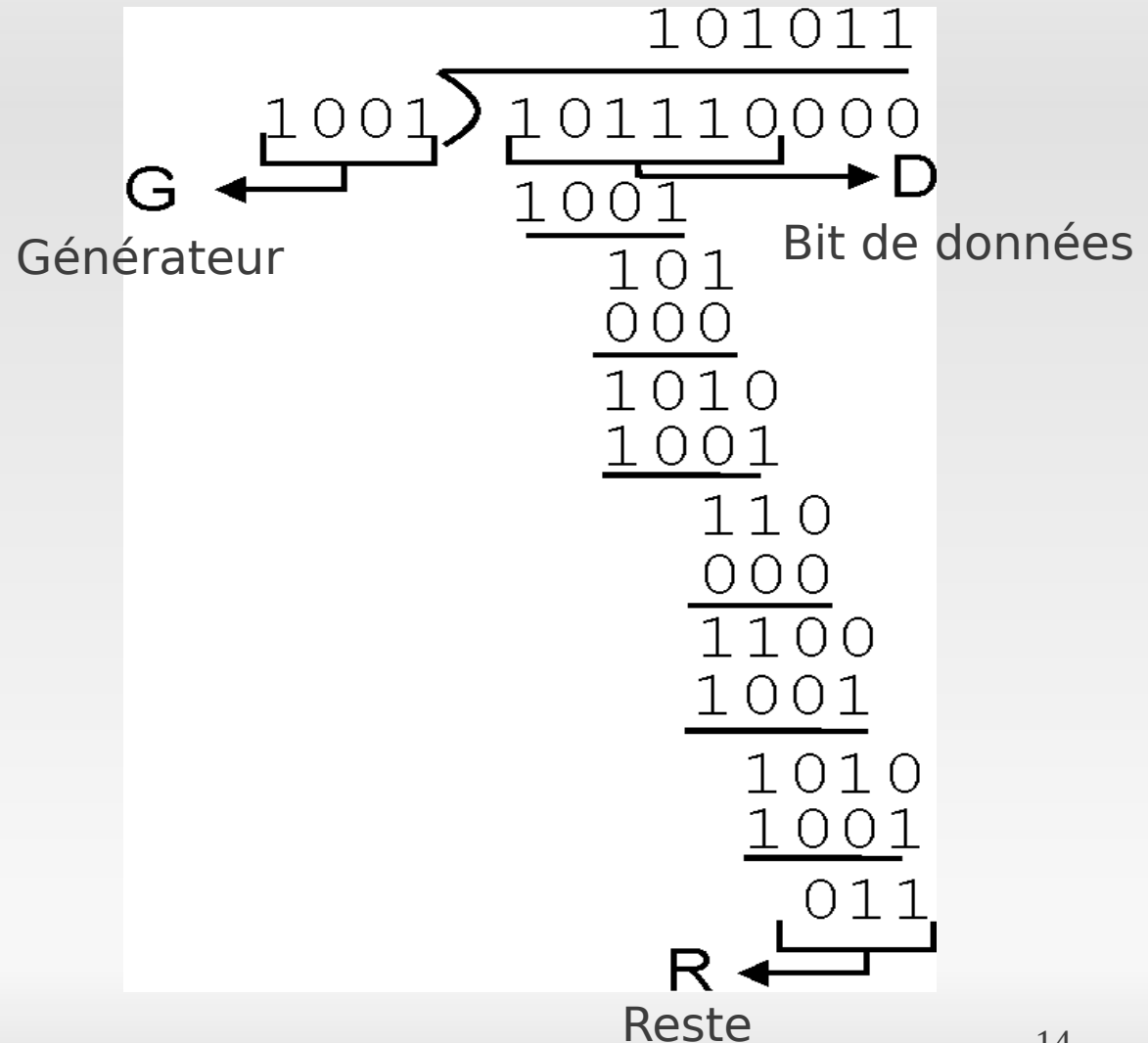
Équivalent à :

$$D \cdot 2^r = nG \text{ XOR } R$$

Équivalent à :

si on divise $D \cdot 2^r$ par G ,
on veut le reste R

$$R = \text{reste} \left[\frac{D \cdot 2^r}{G} \right]$$



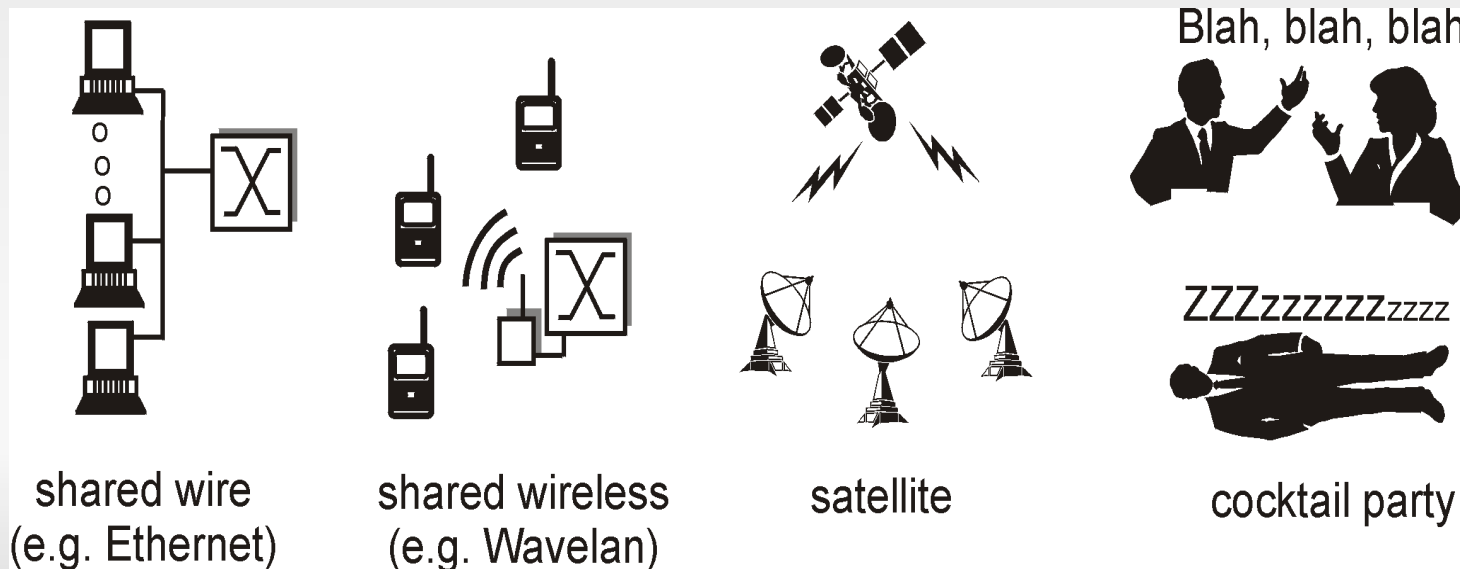
Chapitre 5: La couche liaison

- 5.1 Introduction et services
- 5.2 Détection d'erreur et correction
- 5.3 Protocole d'accès multiple
- 5.4 Adressage de la couche liaison
- 5.5 Ethernet
 - Ethernet
 - Hubs et switches
- 5.6 Wifi
 - Liaison sans fil caractéristique
 - CDMA
 - IEEE 802.11 réseaux locaux (LANs) sans fil (“wi-fi”)
 - Accès internet pour les cellulaires
 - architecture
 - standards (e.g., GSM)
- 5.7 Liaison point à point (PPP)

Protocoles d'accès multiple

Deux types de "liens":

- point-à-point
 - PPP pour accès par dial-up
 - Lien point-à-point entre un switch/pont Ethernet et un hôte
- **diffusion** (partage d'un câble ou matériel)
 - Vieille version d'Ethernet
 - upstream HFC
 - LAN 802.11 sans fil



Protocoles d'accès multiple

- Canal de communication unique partagé
- Deux ou plusieurs transmissions simultanées par noeud : interférence
 - Seul un noeud peut, à un instant donné, envoyer des données avec succès
- *Protocole d'accès multiple :*
 - Algorithme distribué qui détermine comment les stations partagent un canal,
 - Les communications entre les stations doivent utiliser le canal lui-même !
 - Caractéristiques du protocole :
 - synchrone ou asynchrone
 - information nécessaire aux autres stations
 - robustesse (aux erreurs du canal)
 - performance

Protocole d'accès multiple idéal

Canal de diffusion de taux R bps

1. Lorsqu'un noeud veut transmettre il peut transmettre à un taux R .
2. Lorsque M noeuds veulent transmettre, chacun transmet en moyenne à un taux de R/M
3. Totalement décentralisé:
 - Pas de noeud spécial qui coordonne les transmissions
 - Pas de synchronisations des horloges des intervalles de temps.
4. Simple

Taxonomie des protocoles d'accès multiple

Trois grandes classes :

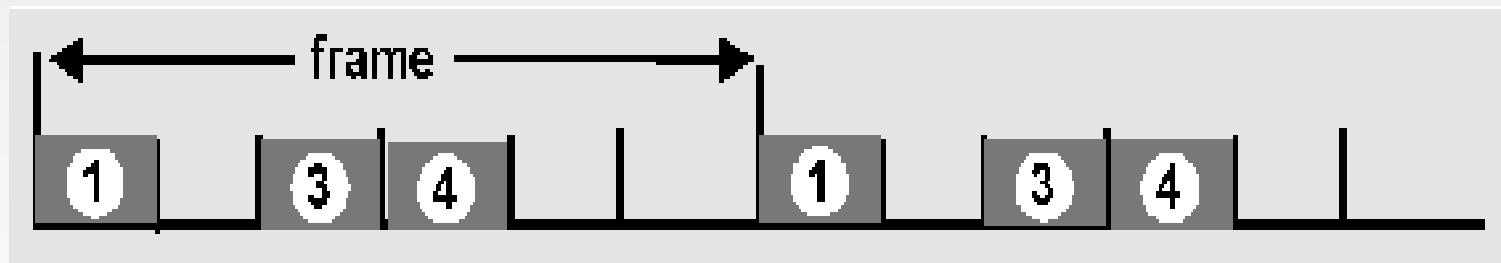
- **Partage de canal**
 - Division du canal en petits bouts (temps, fréquence, code)
 - Allocation de ressource dans un noeud pour une utilisation exclusive
- **Accès aléatoire**
 - Permet les collisions
 - Doit réagir face aux collisions
- **“On attend son tour”**
 - Coordination de l'accès au média partagé pour éviter les collisions

But : efficace, équitable, simple, décentralisé

Protocoles à partage de canal : TDMA

TDMA: Time Division Multiple Access

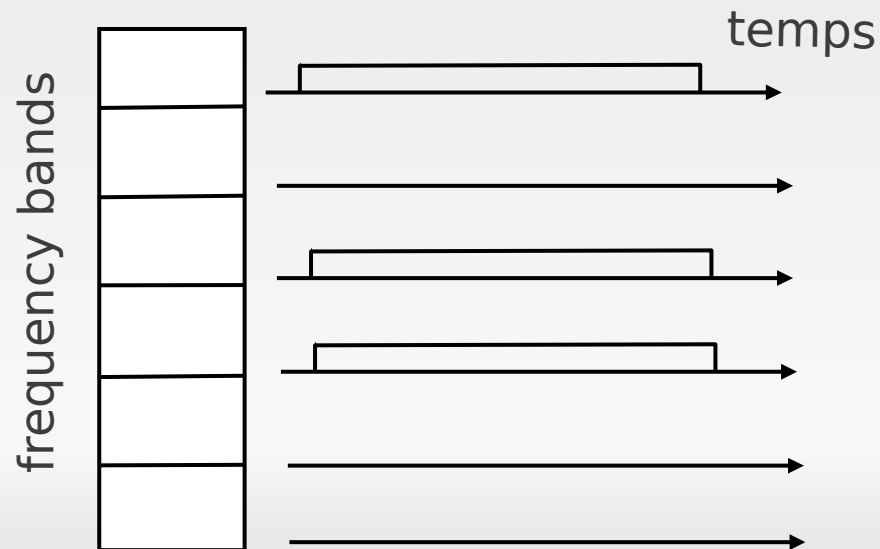
- Accès au canal à tour de rôle
- Chaque station obtient un slot de temps de longueur fixée à chaque tour
- Les slots inutilisés sont en attente
- exemple: 6 stations LAN, 1,3,4 ont des paquets, slots 2,5,6 endormie



Protocoles à partage de canal : FDMA

FDMA: frequency division multiple access

- Le spectre est divisé en plusieurs fréquences
- Une fréquence est assignée à chaque station
- Les fréquences inutilisées sont en attente
- exemple: 6 stations LAN, 1,3,4 ont des paquets, les fréquences 2,5,6 sont endormies



Protocoles d'accès aléatoire

- Lorsqu'un noeud a un paquet à envoyer
 - Transmission au taux maximal R des capacités du canal
 - Pas de coordination entre les noeuds
- Si deux ou + des noeuds transmettent en même tps => "collision",
- **Le protocole d'accès aléatoire** spécifie :
 - Comment détecter les collisions
 - Comment réagir face aux collisions (exp. transmission retardée)
- Exemples de protocole d'accès aléatoire:
 - ALOHA à allocation temporelle
 - ALOHA
 - CSMA et CSMA/CD

Aloha à allocation temporelle

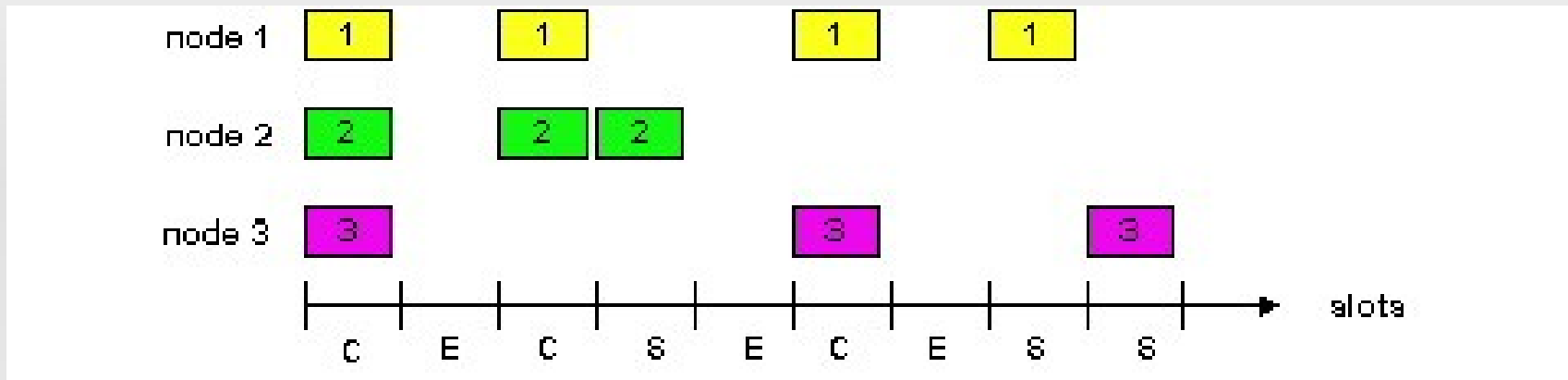
Hypothèses

- Toutes les trames sont de même taille
- Le temps est divisé en intervalle de même taille = au temps de transmission d'une trame
- Un noeud commence à transmettre des trames seulement au commencement d'un intervalle
- **Les noeuds sont synchronisés**
- Si deux noeuds ou plus transmettent dans un intervalle, tous les noeuds détectent une collision.

Opérations

- Lorsqu'un noeud obtient un trame fraîche, il la transmet lors du prochain intervalle de temps
- S'il n'y a pas de collision, le noeud peut transmettre une nouvelle trame dans l'intervalle suivant.
- S'il y a collision, le noeud retransmet la trame dans chaque intervalle ultérieur avec une probabilité p jusqu'à ce que la transmission réussisse.

Aloha à allocation temporelle



Intervalle Succès (S), Collision (C), Vide (E)

Aspects positifs.

- Un seul noeud actif peut transmettre continûment à un taux de transmission plein
- Hautement décentralisé: seulement les intervalles de temps dans les noeuds doivent être décentralisés.
- Simple

Aspects négatifs

Collisions, des intervalles gaspillés.

- Des intervalles inutiles
- Les noeuds peuvent détecter une collision en moins de temps que la durée de transmission
- Synchronisation d'horloge

Efficacité de Aloha avec allocation temporelle

Q: Quelle est le taux d'utilisation maximum ?

R: Supposons que l'on a N stations

- Chacune transmet dans un intervalle avec une probabilité p
- La probabilité de transmission réussie S est:

par un noeud isolé : $S = p (1-p)^{(N-1)}$

pour la totalité des N noeuds:

$$\begin{aligned} S &= \text{Prob (qu'un seul transmette)} \\ &= N p (1-p)^{(N-1)} \end{aligned}$$

... choix de l'optimum p lorsque N -> infinie..

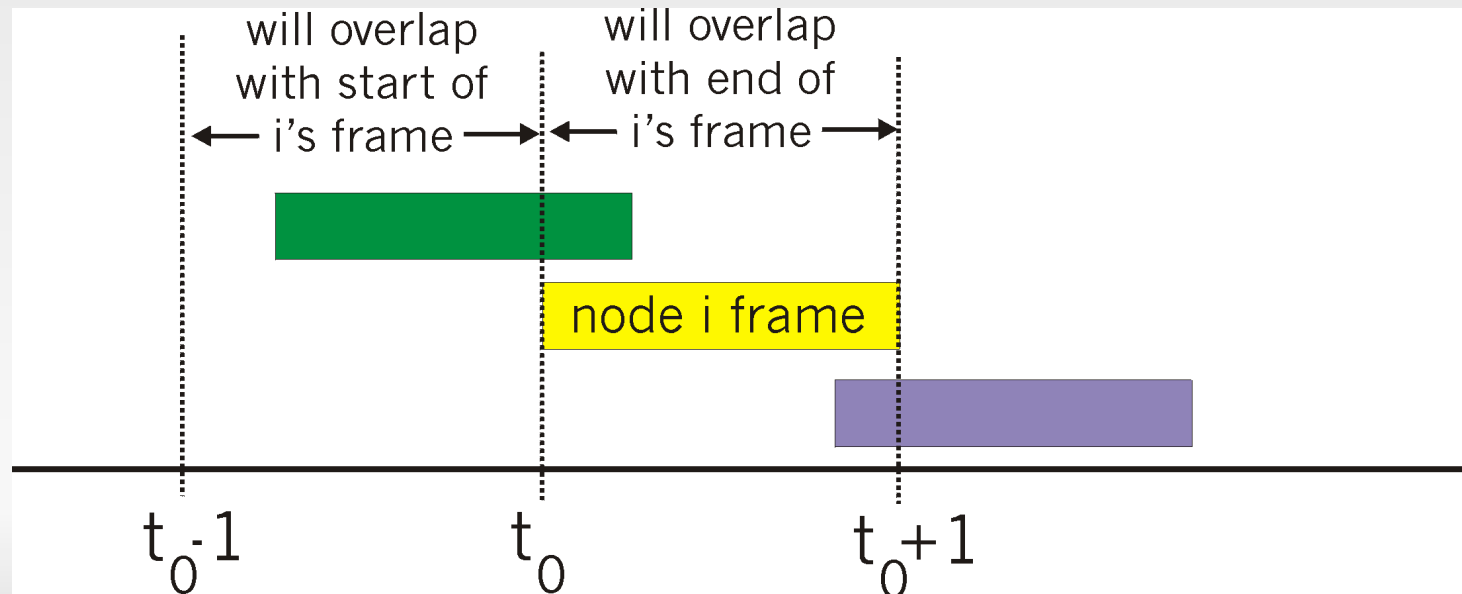
$$= 1/e$$

$$= .37 \text{ lorsque } n \rightarrow \text{infinie}$$

Au mieux : le canal est utilisé pour 37 % de transmissions utiles !

ALOHA “pur”

- Aloha pur : plus simple, pas de synchronisation
- Les paquets qui ont besoin d'être transmission :
 - Envoyés sans attendre le début d'un intervalle
- ... mais la probabilité de collision augmente :
 - Paquet envoyé à t_0 entre en collision avec les autres paquets envoyés dans l'intervalle $[t_0-1, t_0+1]$



Aloha "pur"

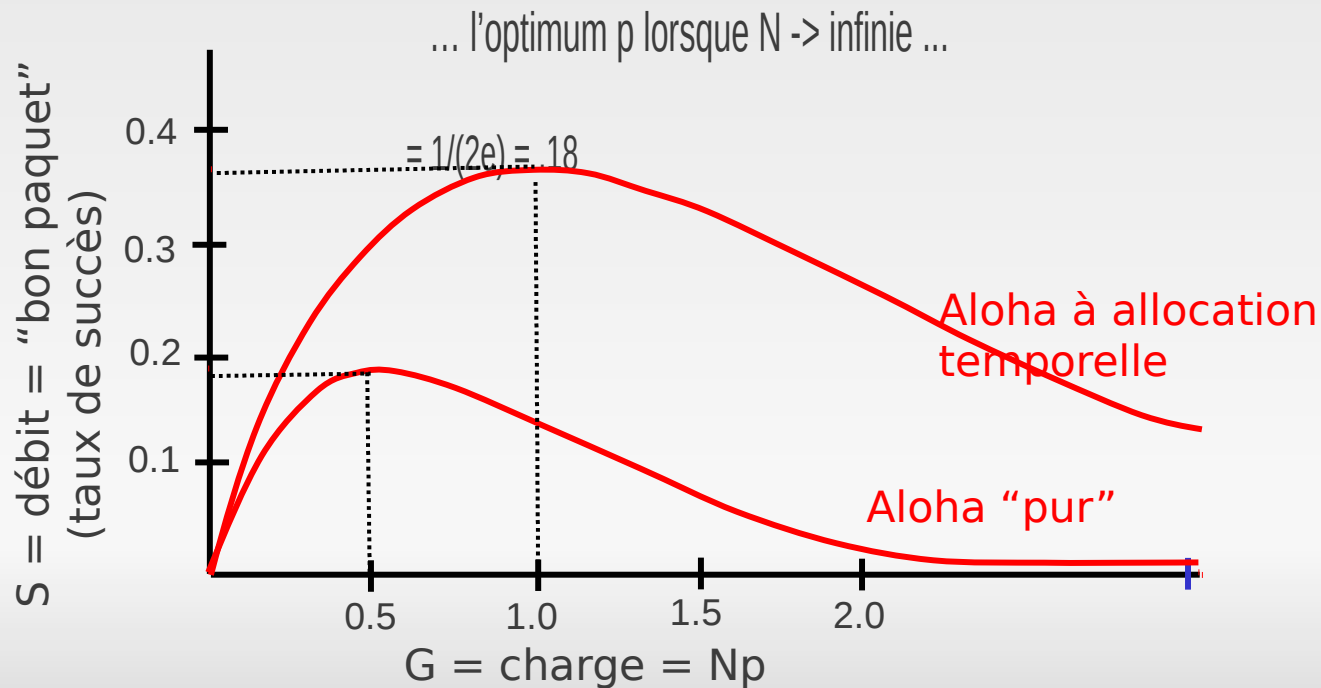
$P(\text{succès pour un noeud}) = P(\text{transmission d'un noeud})$

$P(\text{aucun noeud ne transmette } [p_0-1, p_0])$

$P(\text{aucun noeud ne transmette } [p_0-1, p_0])$

$$= p \cdot (1-p)^{N-1} \cdot (1-p)^{N-1}$$

$P(\text{succès pour chacun des } N \text{ noeuds}) = N p \cdot (1-p)^{N-1} \cdot (1-p)^{N-1}$



Le protocole
contraint le débit du
canal !

CSMA: Carrier Sense Multiple Access

CSMA: on écoute avant de transmettre:

- Si le canal est en attente : on transmet le paquet complet
- Si le canal est occupé, on remet la transmission à plus tard
 - **CSMA persistant** : on réessaie immédiatement avec une probabilité p lorsque le canal est libre
 - **CSMA non-persistant** : réessaie après un nombre aléatoire d'intervalle
- Analogie humaine : on n'interrompt pas les autres !

Collisions CSMA

Des collisions peuvent se produire:

Deux noeuds peuvent ne pas s'apercevoir de la transmission de l'autre.

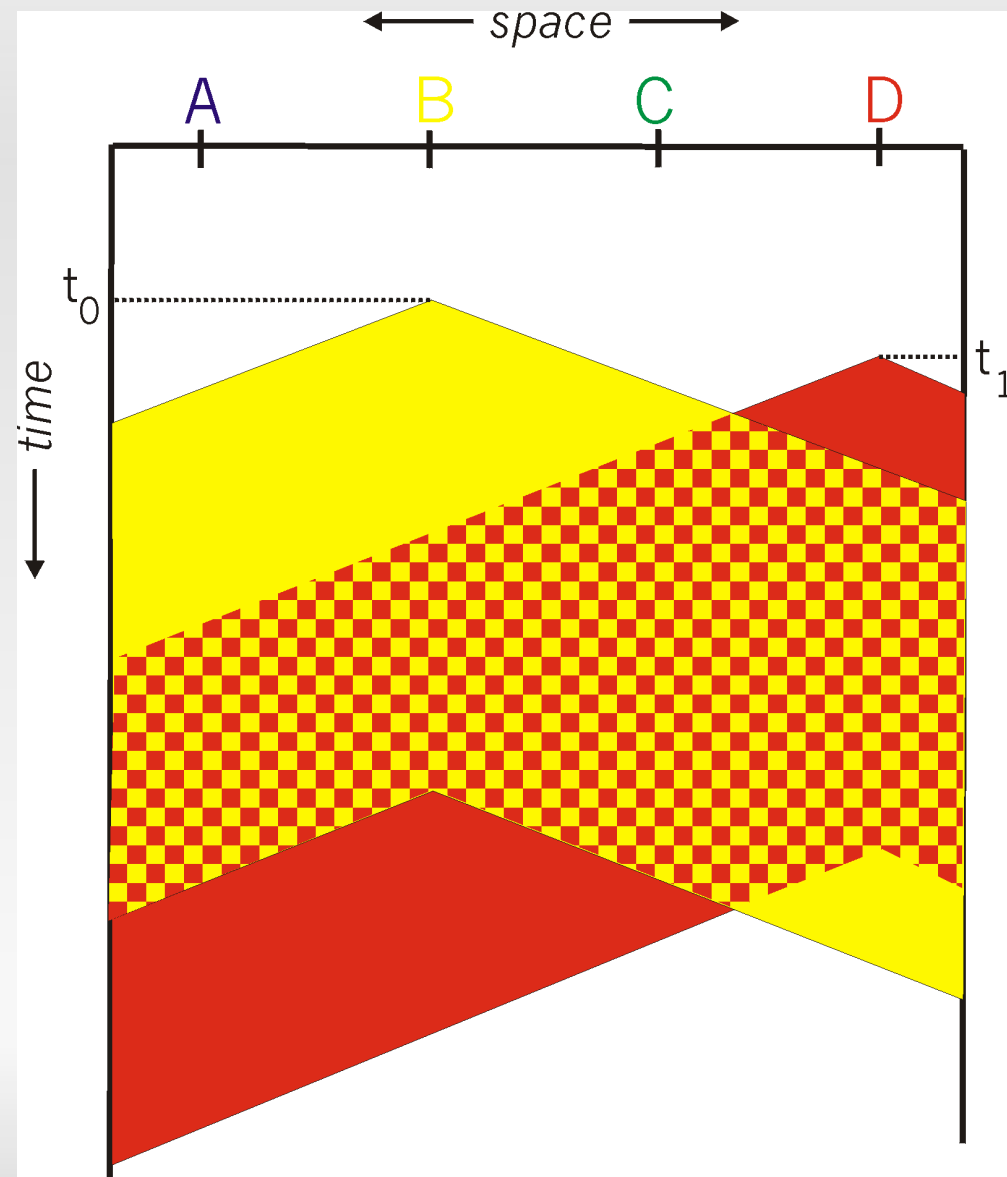
Collision:

Le temps de transmission du paquet perdue.

Note:

Rôle de la distance et du temps de propagation dans la détermination de la probabilité de collision.

Vision spacial des noeuds sur ethernet

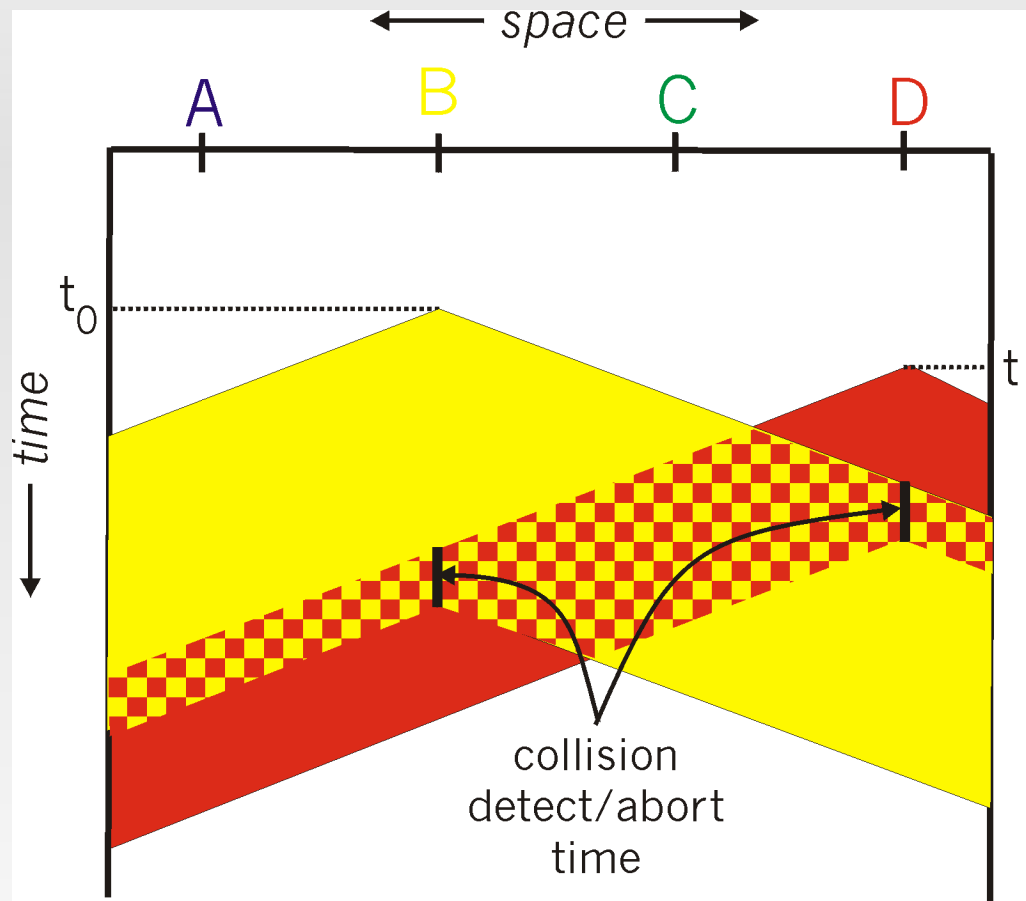


CSMA/CD (Détection de Collision)

CSMA/CD: détection de porteuse,

- Collisions *détectées* dans un temps très court
- En cas de collision la transmission est interrompue => réduit la perte du canal.
- Retransmission persistante ou non-persistante
- Détection de collisions :
 - Facile dans les LAN filaires : mesure de la force du signal, comparaison des transmissions, réception des signaux
 - Difficile dans les LAN sans-fils: le récepteur s'arrête lors de la transmission
- Analogie humaine : la politesse

CSMA/CD (détection de collision)



Protocole à partage de ressources

Protocole à partage de canal :

- Partage efficace d'un canal pour de fortes charges
- Inefficace pour des charges faibles : temps d'accès au canal, $1/N$ bande passante allouée même si un seul noeud est actif !

Protocole d'accès aléatoire

- Efficace pour des faibles charges : un seul noeud peut utiliser complètement le canal
- Fortes charges : surcoût lié aux collisions

Protocole à partage de ressources

On recherche le meilleur des deux!

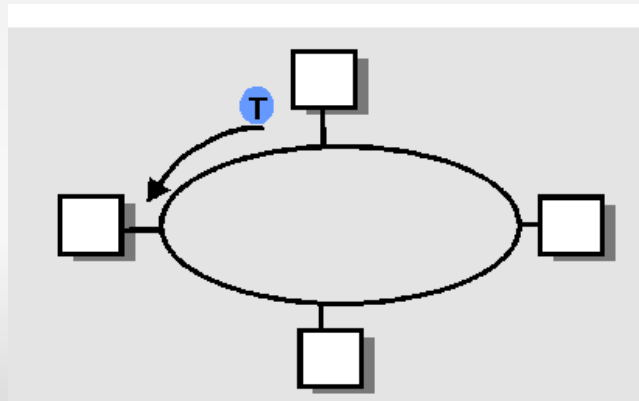
Protocole à partage de ressources

Invitation :

- Noeud maître “invite” les noeuds esclaves à transmettre à leur tour
- Nécessite l’envoi de messages d’invitation
- Problèmes :
 - Surcoût lié à la technique
 - Latence
 - Point sensible (le maître)

Jetons :

- ▢ Le contrôle passe d’un noeud à un autre séquentiellement
- ▢ Passage d’un jeton
- ▢ Problèmes :
 - ▢ Surcoût lié au jeton
 - ▢ Latence
 - ▢ Point sensible (le jeton)



Résumé des protocoles MAC

- Que fait-on avec un canal partagé ?
 - Canal divisé en temps, en fréquence ou par un code (voir réseau Wifi)
 - Accès aléatoire,
 - ALOHA, ALOHA pur, CSMA, CSMA/CD
 - Détection de porteuse : facile avec certaine techno (filaire), plus difficile avec d'autre (sans fils)
 - CSMA/CD utilisé par l'Ethernet
 - Partage de ressources
 - Invitation d'un noeud central, passage d'un jeton

Chapitre 5: La couche liaison

- 5.1 Introduction et services
- 5.2 Détection d'erreur et correction
- 5.3 Protocole d'accès multiple
- 5.4 Adressage de la couche liaison
- 5.5 Ethernet
 - Ethernet
 - Hubs et switches
- 5.6 Wifi
 - Liaison sans fil caractéristique
 - CDMA
 - IEEE 802.11 réseaux locaux (LANs) sans fil (“wi-fi”)
 - Accès internet pour les cellulaires
 - architecture
 - standards (e.g., GSM)
- 5.7 Liaison point à point (PPP)

Adresses LAN et ARP

@ IP 32 bits :

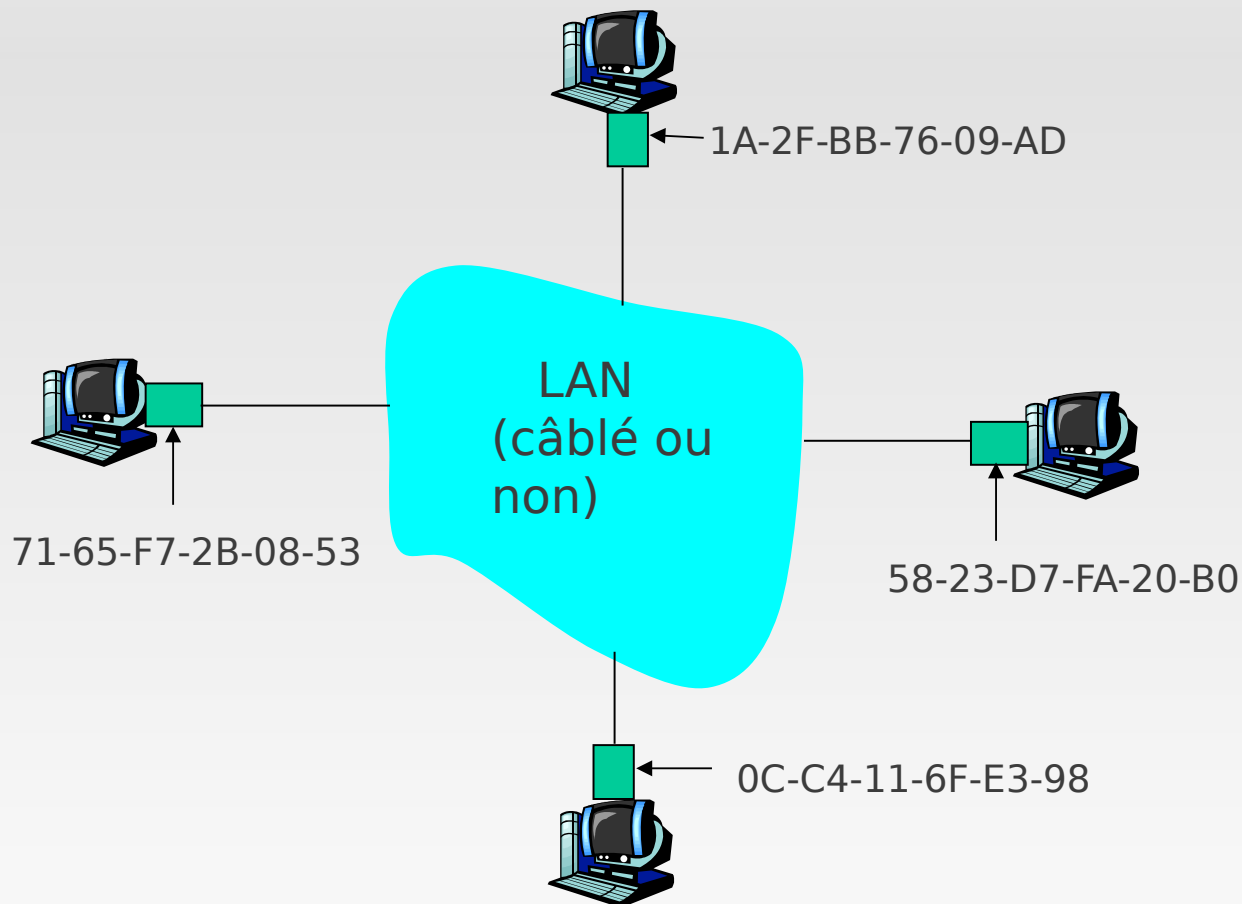
- Adresse de *couche réseau*
- Utilisée pour envoyer le datagramme jusqu'à sa destination

Adresse LAN (ou MAC ou physique) :

- Utilisée pour envoyer le datagramme d'une interface à une autre connectée physiquement (sur le même réseau)
- Adresse MAC sur 48 bits
inscrite en dur dans la ROM de l'adaptateur réseau

Adresses LAN et ARP

Chaque adaptateur sur le LAN a une unique adresse LAN



Adresse de diffusion =
FF-FF-FF-FF-FF-FF

■ = adaptateur

Adresses LAN

- L'allocation des adresses MAC est gérée par IEEE
- Les fabricants achètent une portion de l'espace des adresses MAC (pour assurer l'unicité)
- Analogie:
 - (a) adresses MAC : N° sécurité social
 - (b) adresse IP : adresse postale
- Portabilité des @ MAC
 - On peut bouger une carte LAN d'un LAN sur un autre
- Les @ IP sont hiérarchiques et non portable
 - Elles dépendent du réseau sur lesquelles elles se trouvent

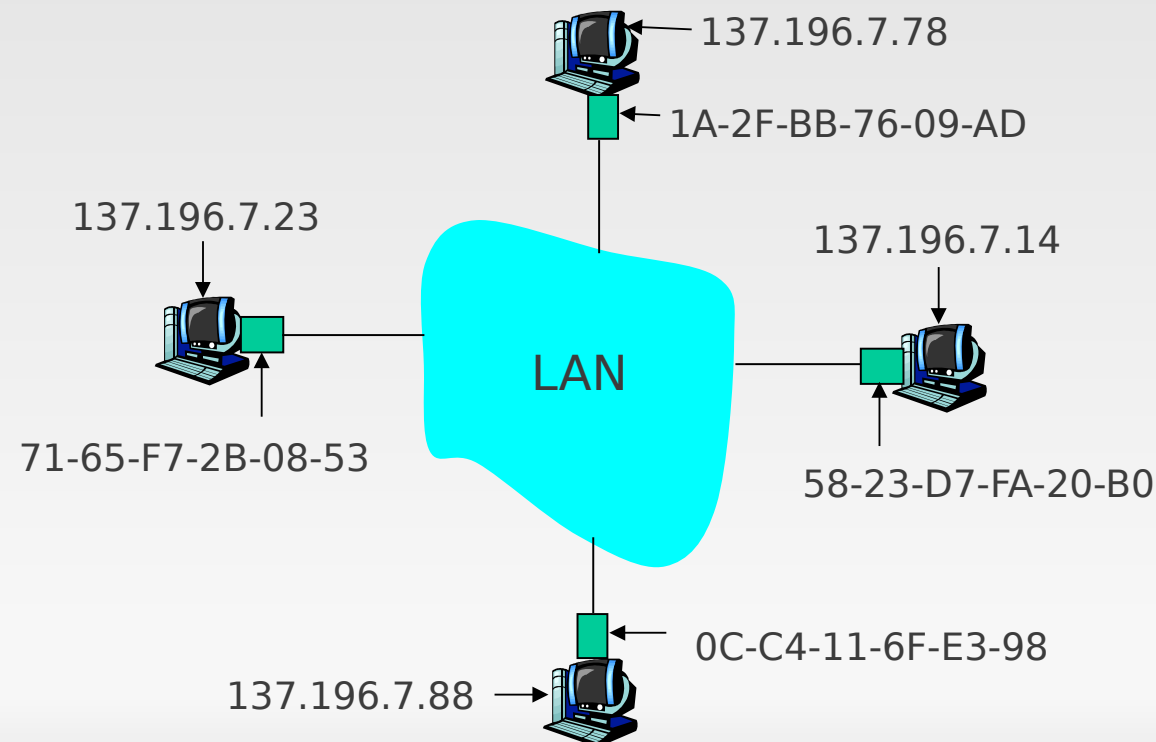
ARP: Address Resolution Protocol

Question: comment déterminer l'adresse MAC de B à partir de son adresse IP?

- Chaque noeud IP (Hôte, Routeur) sur un LAN a une table **ARP**
- Table ARP: correspondance des adresses IP/MAC pour certains noeuds du LAN

< IP address; MAC address; TTL >

- TTL (Time To Live): temps après lequel l'adresse sera oubliée (typiquement 20 min)



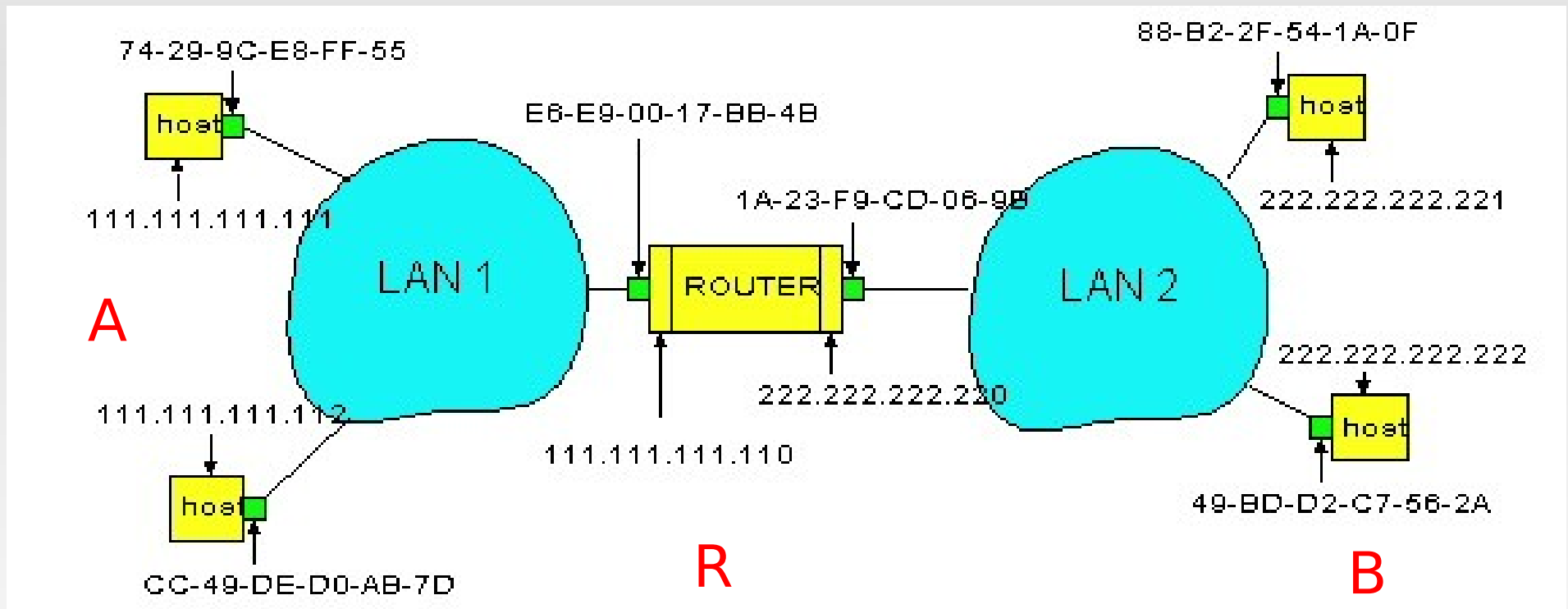
Protocole ARP : sur le même LAN (réseau)

- **A** veut envoyer un datagramme à **B**, mais l'adresse MAC de **B** n'est pas dans la table ARP de **A**.
- **A** diffuse alors un paquet contenant une requête ARP, i.e., qui contient l'adresse IP de **B**.
 - Adresse MAC de dest. = FF-FF-FF-FF-FF-FF
 - Toutes les machines sur le LAN reçoivent la requête ARP.
- **B** reçoit le paquet ARP, et répond à **A** avec son adresse MAC
 - Trame envoyée à l'adresse MAC de **A**.
- **A** met en mémoire la paire d'adresse IP-MAC dans sa table ARP jusqu'à ce que cette information soit périmée
 - Etat temporaire: information qui se périmé sauf si elle est rafraîchie
- ARP est “plug-and-play”:
 - Les noeud crée leur table ARP sans l'intervention de l'administrateur.

Routage vers un autre LAN

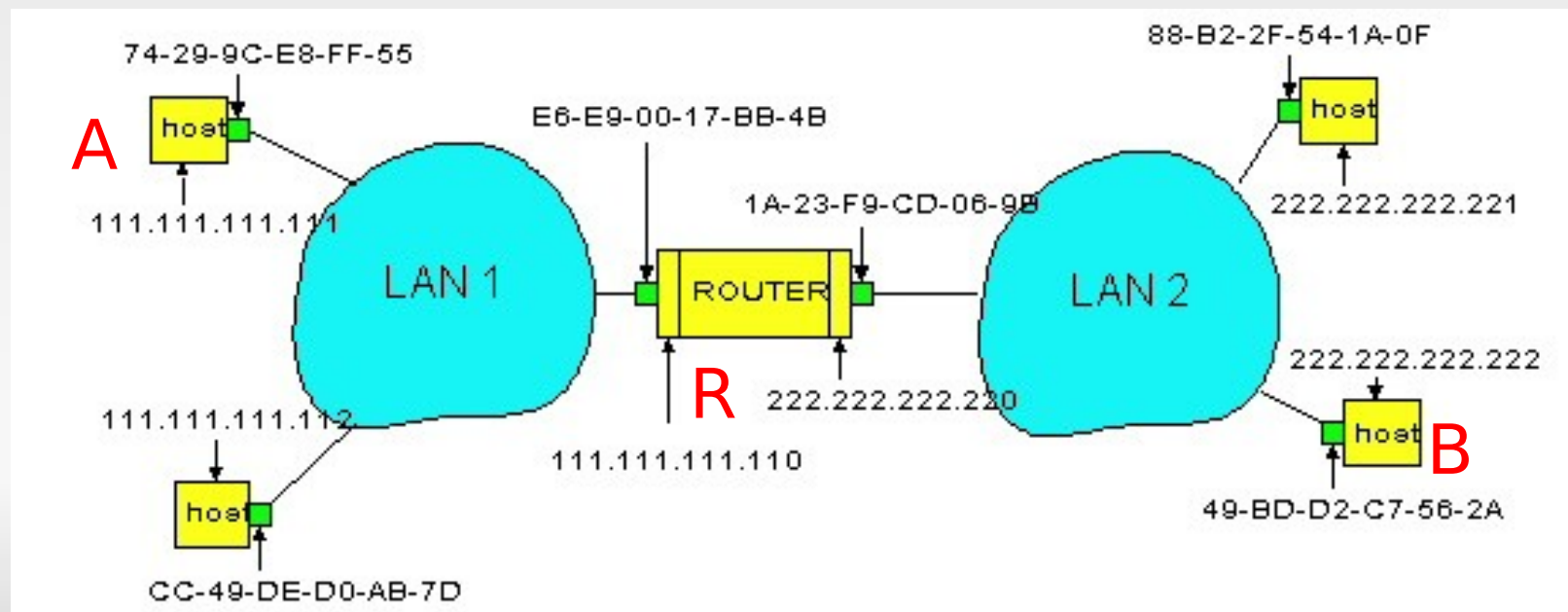
Envoi d'un datagramme de **A** à **B** via **R**.

Supposons que **A** connaisse l'adresse IP de **B**



- Deux tables ARP dans le routeur **R**, un pour chaque réseau IP (LAN)
- Dans la table de routage de l'hôte source il y a le routeur 111.111.111.110
- Dans la table ARP à la source, l'hôte trouve l'adresse MAC E6-E9-00-17-BB-4B, correspondant à 111.111.111.110, etc.

- **A** crée un datagramme de source **A** et de dest. **B**
- **A** utilise l'ARP pour obtenir l'adresse MAC de **R** pour l'@ IP 111.111.111.110
- **A** crée une trame de couche liaison avec l'adresse MAC de **R** comme destinataire, la trame contient le datagramme IP **A-vers-B**
- adaptateur de **A** envoie la trame
- Adaptateur de **R** reçoit la trame
- **R** récupère le datagramme IP datagram de la trame Ethernet, voit qu'il est destiné à **B**
- **R** utilise l'ARP pour avoir l'adresse MAC de **B**
- **R** crée une trame contenant le datagramme IP **A-vers-B** IP et l'envoie a **B**



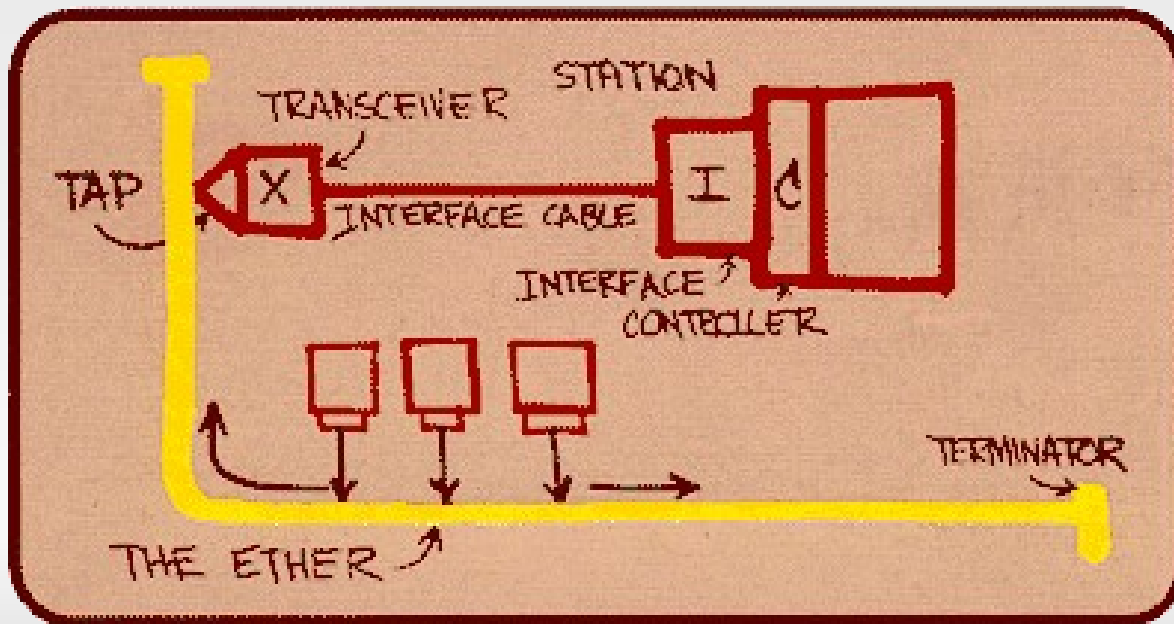
Chapitre 5: La couche liaison

- 5.1 Introduction et services
- 5.2 Détection d'erreur et correction
- 5.3 Protocole d'accès multiple
- 5.4 Adressage de la couche liaison
- 5.5 Ethernet
 - Ethernet
 - Hubs et switches
- 5.6 Wifi
 - Liaison sans fil caractéristique
 - CDMA
 - IEEE 802.11 réseaux locaux (LANs) sans fil (“wi-fi”)
 - Accès internet pour les cellulaires
 - architecture
 - standards (e.g., GSM)
- 5.7 Liaison point à point (PPP)

Ethernet

Techno qui domine les LAN :

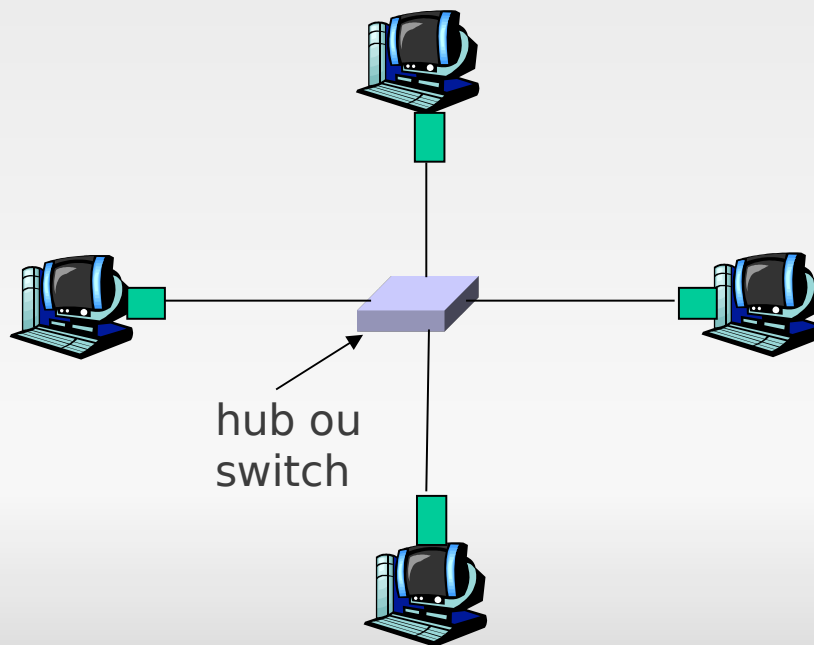
- Pas chère 10€ pour 100Mbps!
- Première techno LAN qui a dominé les marchés
- Simple, moins chère que les LAN à jetons ou ATM
- Gardé au goût du jour avec des vitesses : 10, 100, 1000 Mbps



Système original de Bob MetCalfe qui a Conduit au Standard Ethernet 10Base5

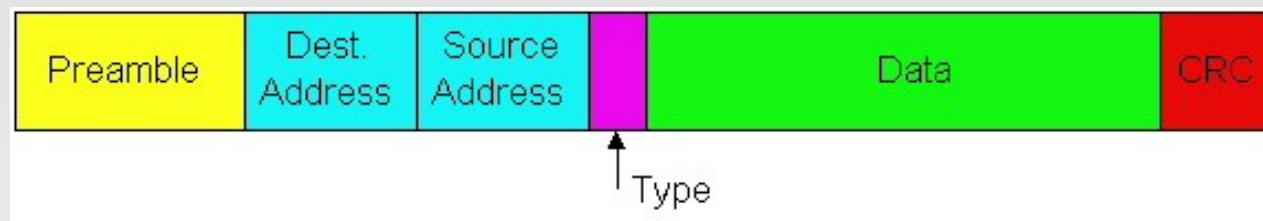
Topologie en étoile

- Topologie en bus populaire au milieu des années 90 :
 - Câble coaxial 10Mb/s
 - Répétiteur connecte les différentes stations sur le bus
- Maintenant la topologie en étoile prédomine
- Choix de connexion: hub ou switch (voir plus tard)



Structure d'une trame Ethernet

L'adaptateur encapsule les datagrammes IP (ou autre) dans des **trames Ethernet**

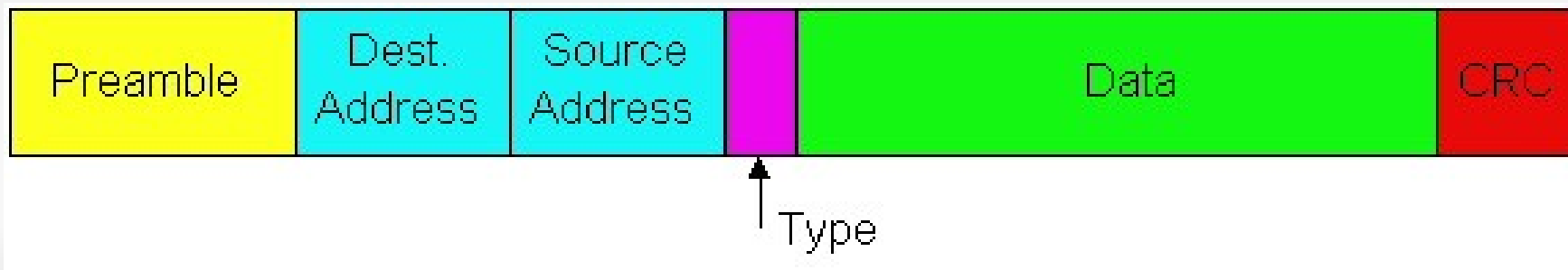


Préambule:

- 7 octets avec le motif 10101010 suivit d'un octet avec le motif 10101011
- Utilisé pour synchroniser les horloges et les taux de transfert de l'expéditeur et du récepteur.

Structure d'une trame Ethernet

- **Adresses:** 6 octets, la trame est reçue par tout les adaptateurs du LAN et jetée si l'adresse ne correspond pas
- **Type:** indique un protocole de plus haut niveau, (souvent IP mais d'autres protocoles sont supportés comme Novell IPX ou AppleTalk)
- **CRC:** vérifié par le récepteur, si une erreur détectée, alors la trame est rejetée



Service sans connexion, et non-fiable

- **Sans connexion:** pas de poignée de main entre les adaptateurs expéditeur et destinataire
- **Non-fiable:** l'adaptateur destinataire n'envoie pas d'accusés de réception (ACK) ou de mauvaise réception (NACK)
 - Le fil de datagrammes passés à la couche réseau peut avoir des trous
 - Les écarts seront comblés si l'application utilise TCP
 - Autrement, l'application verra les trous/paquets manquants

Algorithme CSMA/CD d'Ethernet

1. Adaptateur reçoit un datagramme en provenance de la couche réseau & crée une trame
2. Si l'adaptateur sent que le canal est disponible (écoute durant 96 tps de trans de bit), il commence à transmettre la trame. Si il sent que le canal est occupé, il attend jusqu'à ce que le canal se libère et transmet ensuite la trame.
3. Si l'adaptateur transmet entièrement une trame sans détecter une autre transmission, alors l'adaptateur en a fini avec la trame !
4. Si l'adaptateur détecte une autre transmission lorsqu'il transmet, il stoppe instantanément la transmission et envoie un signal de brouillage.
5. Après l'interruption, l'adaptateur entre dans une **attente exponentielle**: après la m -ème collision, l'adaptateur choisit un entier K au hasard dans $\{0,1,2,\dots,2^m-1\}$. L'adaptateur attend $K \cdot 512$ fois le temps de transmission de bit et retourne à l'étape 2.

Ethernet CSMA/CD (suite)

Signal de bouillage: s'assure que tous les autres adaptateurs sont au courant de la collision (48 bits)

Temps de transm. d'un bit: .1 microsec pour ethernet 10 Mbps; et si $K=1023$, l'attente est de 50 msec

Attente exponentielle:

- *But:* adapte la tentative de retransmission à la charge estimée du canal
 - Lourde charge: l'attente aléatoire sera plus longue
- 1ere collision: on choisit K dans $\{0,1\}$; le délai est de $K \cdot 512$ transmission d'un bit
- Après la seconde collision: le choix de K est dans $\{0,1,2,3\}$...
- Après dix collisions, K est choisi dans $\{0,1,2,3,4,\dots,1023\}$

Efficacité du CSMA/CD

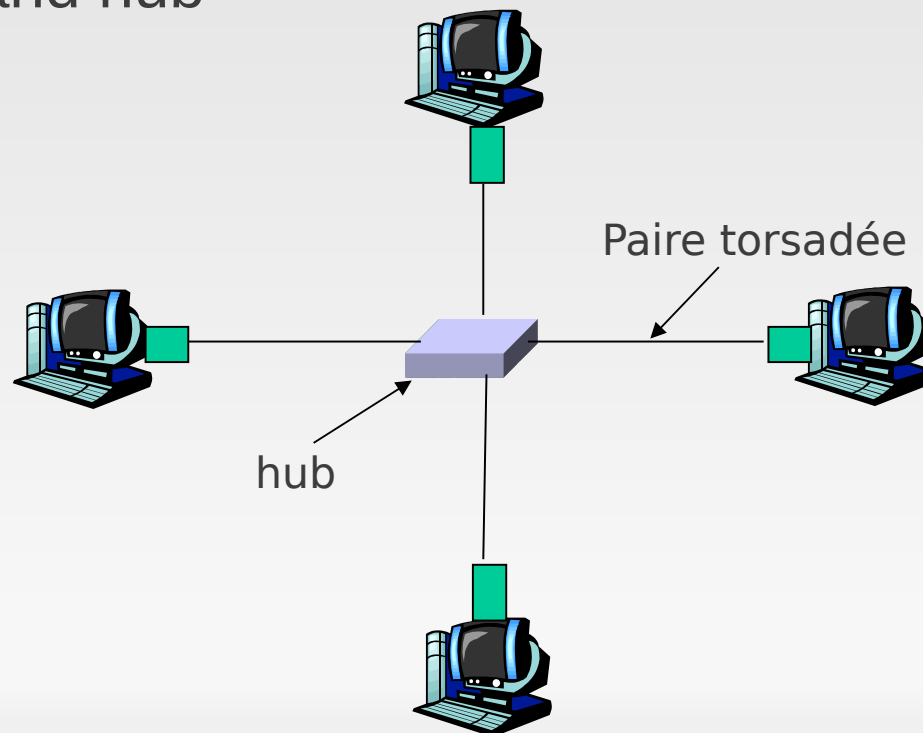
- t_{prop} = propagation maximale entre 2 noeuds sur le LAN
- t_{trans} = temps de transmettre une trame de taille maximale

$$\text{efficacite} = \frac{1}{1 + 5t_{prop}/t_{trans}}$$

- Efficacite tend vers 1 lorsque t_{prop} tend vers 0
- Tend vers 1 lorsque t_{trans} tend vers l'infini
- Bien mieux que ALOHA, mais reste decentralise, simple, pas cher

10BaseT and 100BaseT

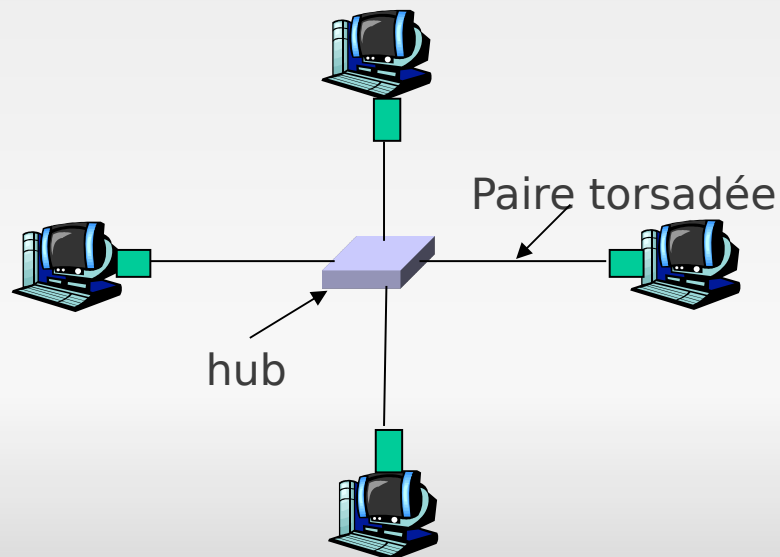
- Taux de 10/100 Mbps ; plus tard appelé “ethernet rapide”
- **T** signifie Paire Torsadée
- Noeuds connectés à un *hub*: “topologie en étoile”; 100 m de distance maximale entre un noeud et le hub between nodes and hub



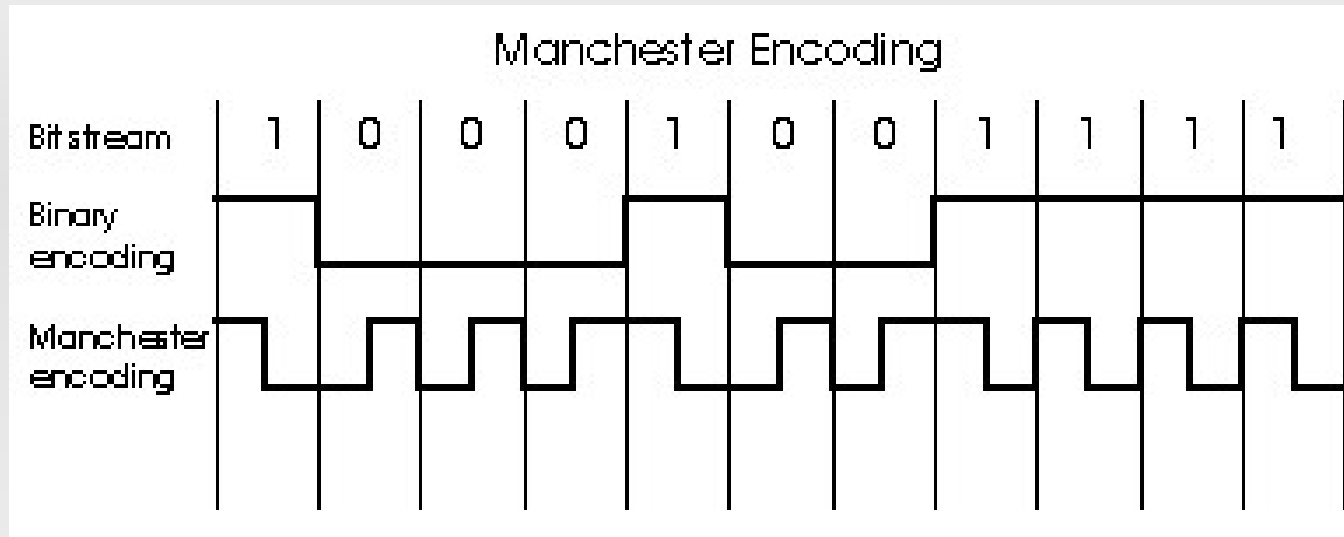
Hubs (concentrateurs)

Les hubs sont essentiellement des répéteurs au niveau de la couche physique:

- Les bits viennent d'un lien et sont répétés sur d'autres liens
- La répétition se fait au même taux
- Pas de mise en tampon/mémoire
- Pas de CSMA/CD au niveau du hub: seuls les adaptateurs détectent les collisions
- Procure des fonctionnalités d'administration



Codage de Manchester



- Utilisé en 10BaseT
- Chaque bit a une transition (vers le haut pour 0 et le bas pour 1)
- Permet aux horloges des noeuds expéditeurs et destinataires de se synchroniser les uns aux autres
 - Pas besoin d'une horloge centralisée parmi les noeuds!
- Ca concerne en fait la couche physique!

Ethernet Gbit

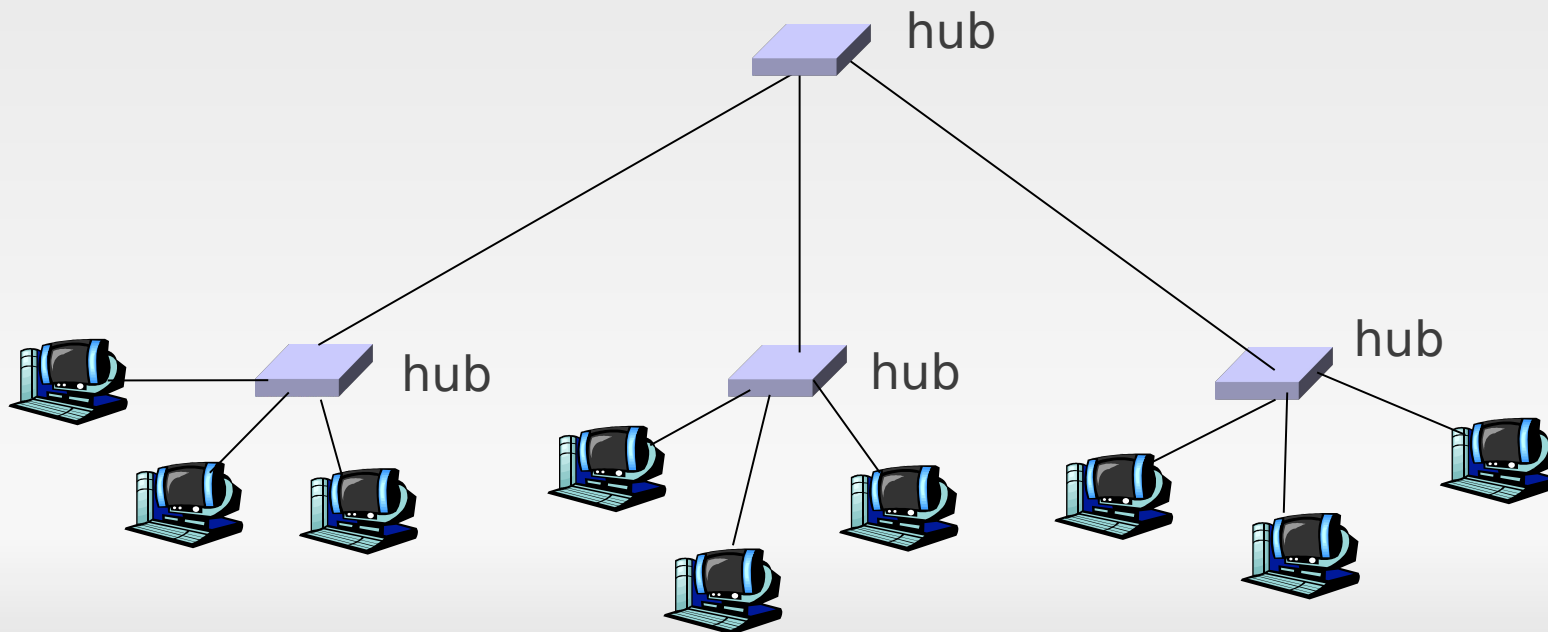
- Basé sur des trames Ethernet standard
- Permet une liaison point à point et de canaux de diffusion partagés
- Recours au protocole CSMA/CD pour les canaux de diffusion partagés. La distance entre les noeuds doit être courte
- Support de liaison Full-Duplex à 1 Gbps pour les liaisons en point à point

Chapitre 5: La couche liaison

- 5.1 Introduction et services
- 5.2 Détection d'erreur et correction
- 5.3 Protocole d'accès multiple
- 5.4 Adressage de la couche liaison
- 5.5 Ethernet
 - Ethernet
 - Hubs et switches
- 5.6 Wifi
 - Liaison sans fil caractéristique
 - CDMA
 - IEEE 802.11 réseaux locaux (LANs) sans fil (“wi-fi”)
 - Accès internet pour les cellulaires
 - architecture
 - standards (e.g., GSM)
- 5.7 Liaison point à point (PPP)

Interconnecter avec des hubs

- Une colonne vertébrale de hubs interconnecte des segments de LAN
- Elargit la distance maximale entre les noeuds
- Mais les segments individuels de collision devient un grand domaine de collision
- Ne peut pas interconnecter des zone hétérogènes 10BaseT & 100BaseT



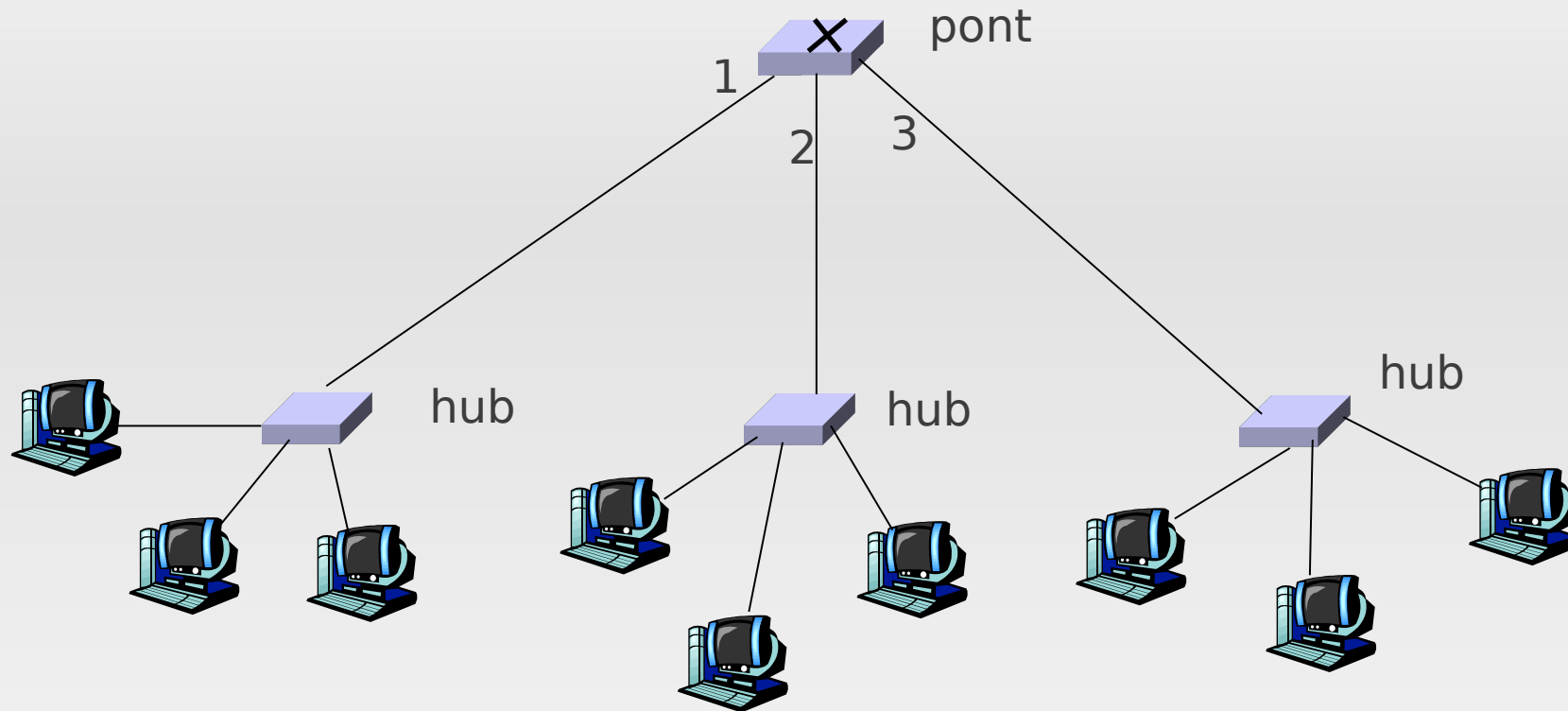
Ponts (ou switch)

- **Équipement de la couche liaison** : traite des trames Ethernet, examine les entêtes des trames et retransmet les trames en fonction de leurs destinations
- Les ponts isolent les domaines de collision vu qu'il y a des tampons
- Lorsqu'une trame va être transmise sur un segment du réseau ethernet, le pont utilise CSMA/CD pour accéder au canal

Ponts (ou switch)

- Avantages du pont :
 - Isole les domaines de collision => débit plus important, ne limite plus le nombre maximum de noeud ou la couverture géographique
 - Peut connecter différentes techno ethernet vu qu'il y a un tampon
 - Transparent : aucun changement nécessaire pour les adaptateurs des hôtes du LAN

Transfert/acheminement



- Comment déterminer sur lequel des segments LAN transférer une trame?
- Ca ressemble à un problème de routage...

Auto apprentissage

- Un pont maintient une table : **la table de filtrage**
- Une entrée dans une table de filtrage consiste en:
 - (MAC Address, Interface, Empreinte de temps (TTL))
 - Entrées périmées dans la table sont éliminées (TTL peut être de 60 min)
- Les ponts **apprennent** quel hôte est accessible et par quelle interface
 - Lorsqu'une trame est reçue, le pont "apprend"/"mémorise" la location de l'expéditeur: les segments LAN entrant
 - Enregistre les expéditeur et leur localisation dans la table de filtrage

Filtrage et réexpédition

Lorsqu'un pont reçoit une trame:

La table de filtrage est indexée sur l'adresse de destination MAC

if entrée de destination est trouvée

then{

if dest. est la même que segment de provenance

then jeter la trame

else expédier la trame sur l'interface indiquée

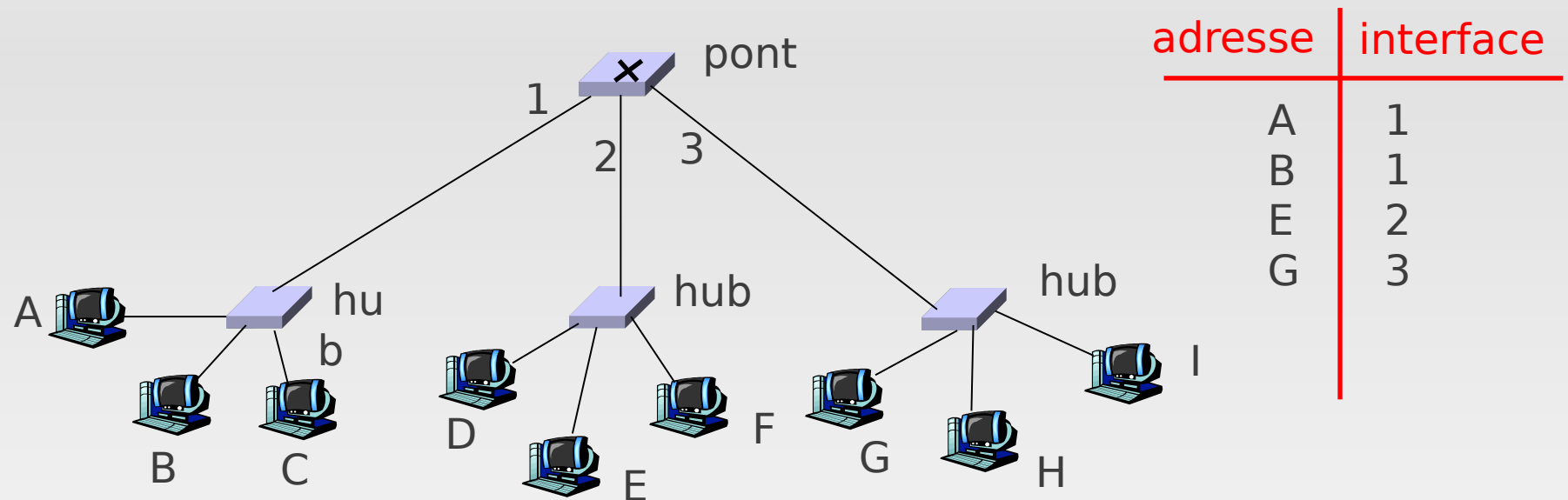
}

else inonder

*Reexpédie sur toutes les interfaces
sauf celle de provenance*

Exemple de pont

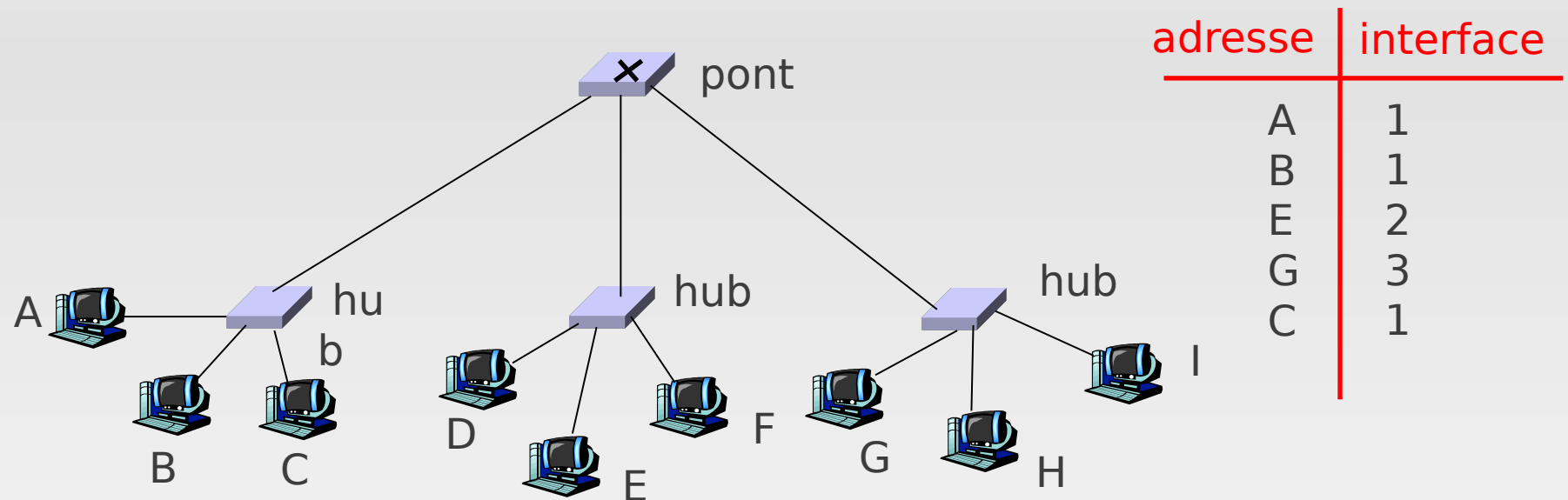
Supposons que C envoie une trame à D



- Le pont reçoit la trame de C
 - Enregistre dans la table de filtrage que C est accessible via l'interface 1
 - Parce D n'est pas dans la table, le pont réexpédie la trame sur l'interface 2 et 3
- La trame est alors reçue par D

Exemple de pont (suite)

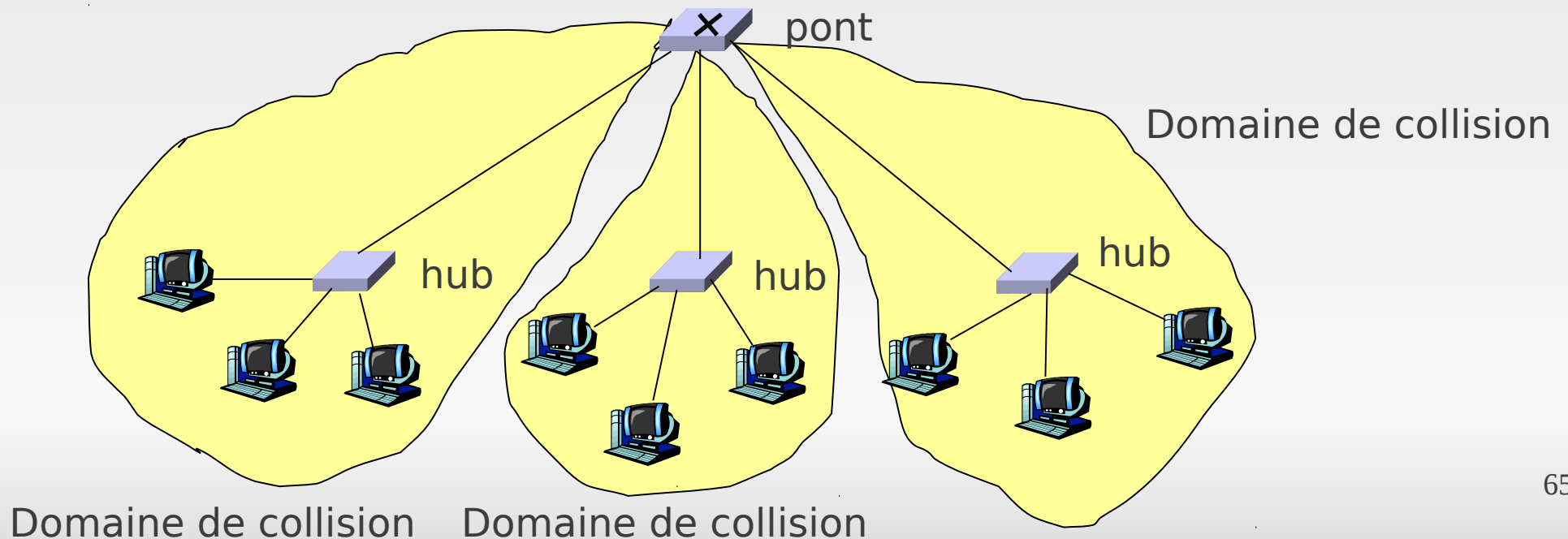
Supposons que D réponde à C avec une trame.



- Le pont reçoit la trame en provenance de D
 - Enregistre dans la table de filtrage que D est accessible via l'interface 2
 - Parce que C est dans la table, le pont transfère la trame sur l'interface 1 indiquée dans la table de filtrage
- La trame est alors reçue par C

Pont: isolation du trafic

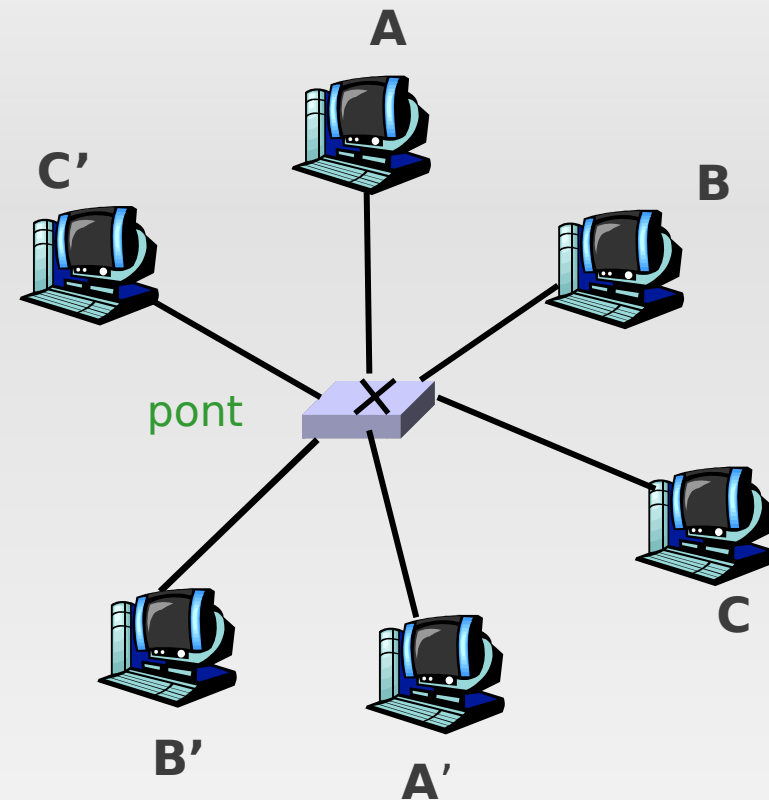
- L'installation de pont divise le sous-réseau en segment LAN
- Le pont **filtre** les paquets:
 - même-segment-LAN trame sont généralement pas réexpédiés sur d'autres segments LAN
 - Les segments LAN deviennent des **domaines de collision** séparés



Pont: accès dédié

- Pont avec plusieurs interfaces
- Un hôte est directement connecté au pont
- Pas de collisions; entièrement en duplex

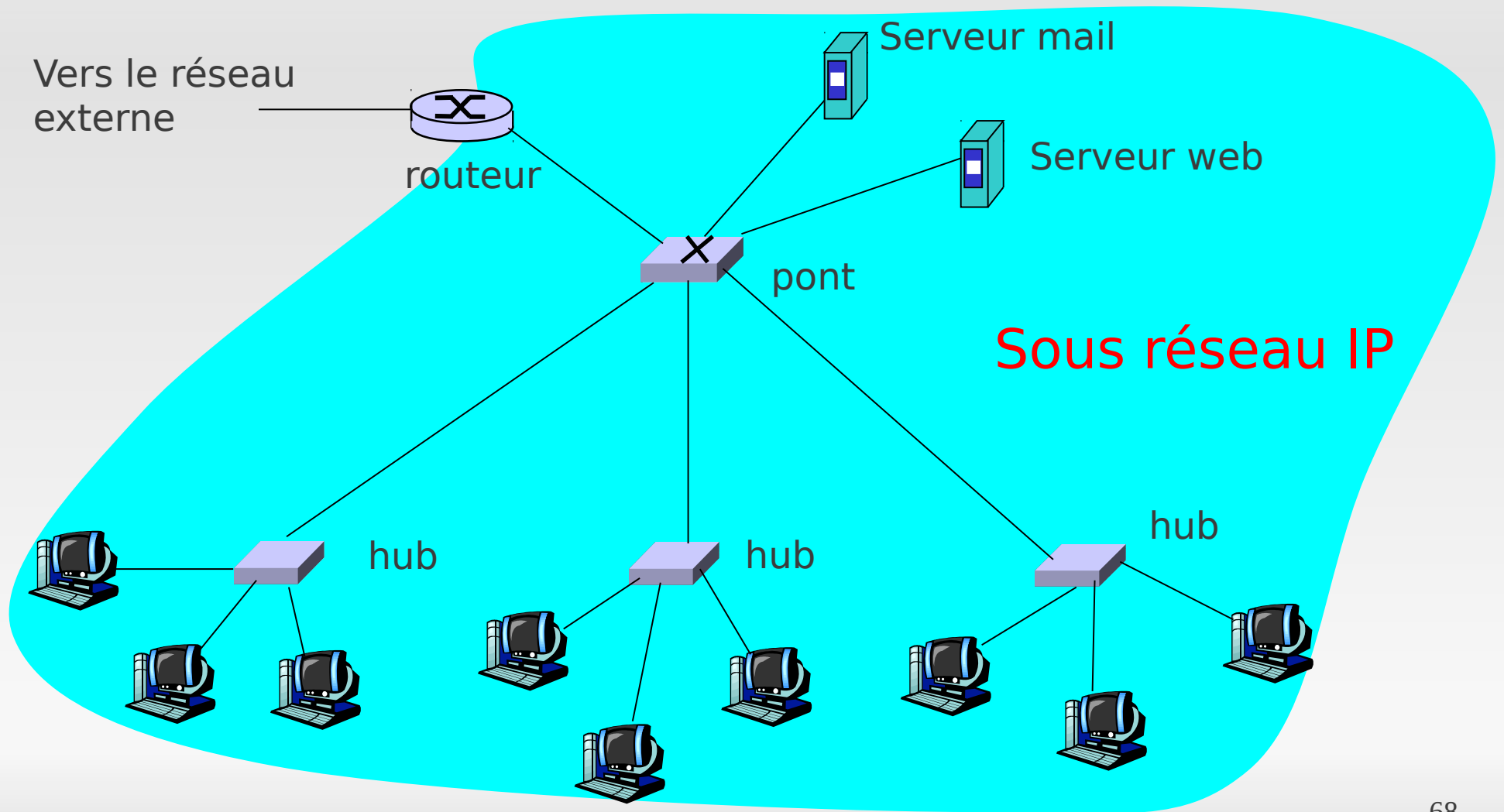
Pont: **A-vers-A'** et **B-vers-B'**
simultanément et sans collisions



Un peu plus sur les ponts

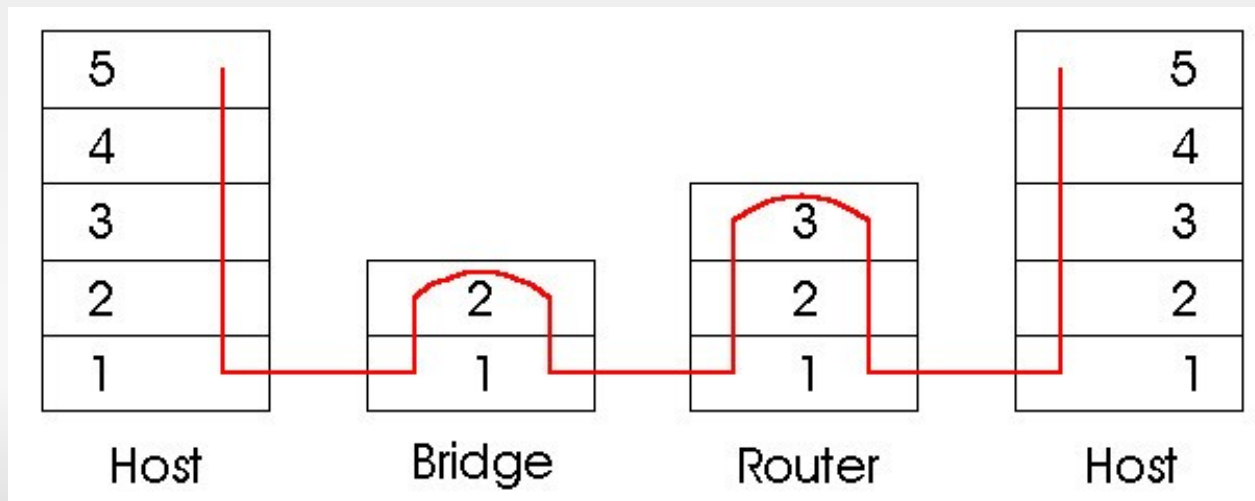
- **Raccourci dans le pont:** les trames transférées du port d'entrée vers le port de sortie sans collecter la trame en entier
 - Légère réduction dans la latence
- Combinaison d'interfaces partagées/dédiées 10/100/1000 Mbps

Réseau institutionnel



Ponts vs. Routeurs

- Tous deux des appareils de type charge-et-transmet :
 - Routeurs: appareil de couche réseau (examine l'entête de la couche réseau)
 - Le pont est un appareil de la couche liaison
- Les routeurs maintiennent des tables de routage et implémentent des algorithmes de routage
- Les ponts maintiennent des tables de filtrages, implémente le filtrage, et l'algorithme d'apprentissage



Résumé comparatif

	<u>hubs</u>	<u>routeurs</u>	<u>ponts</u>
Isolation du trafic	non	oui	ou
plug & play	oui	non	ou
routage optimal	non	oui	nc
raccourci	oui	non	ou

Chapitre 5: La couche liaison

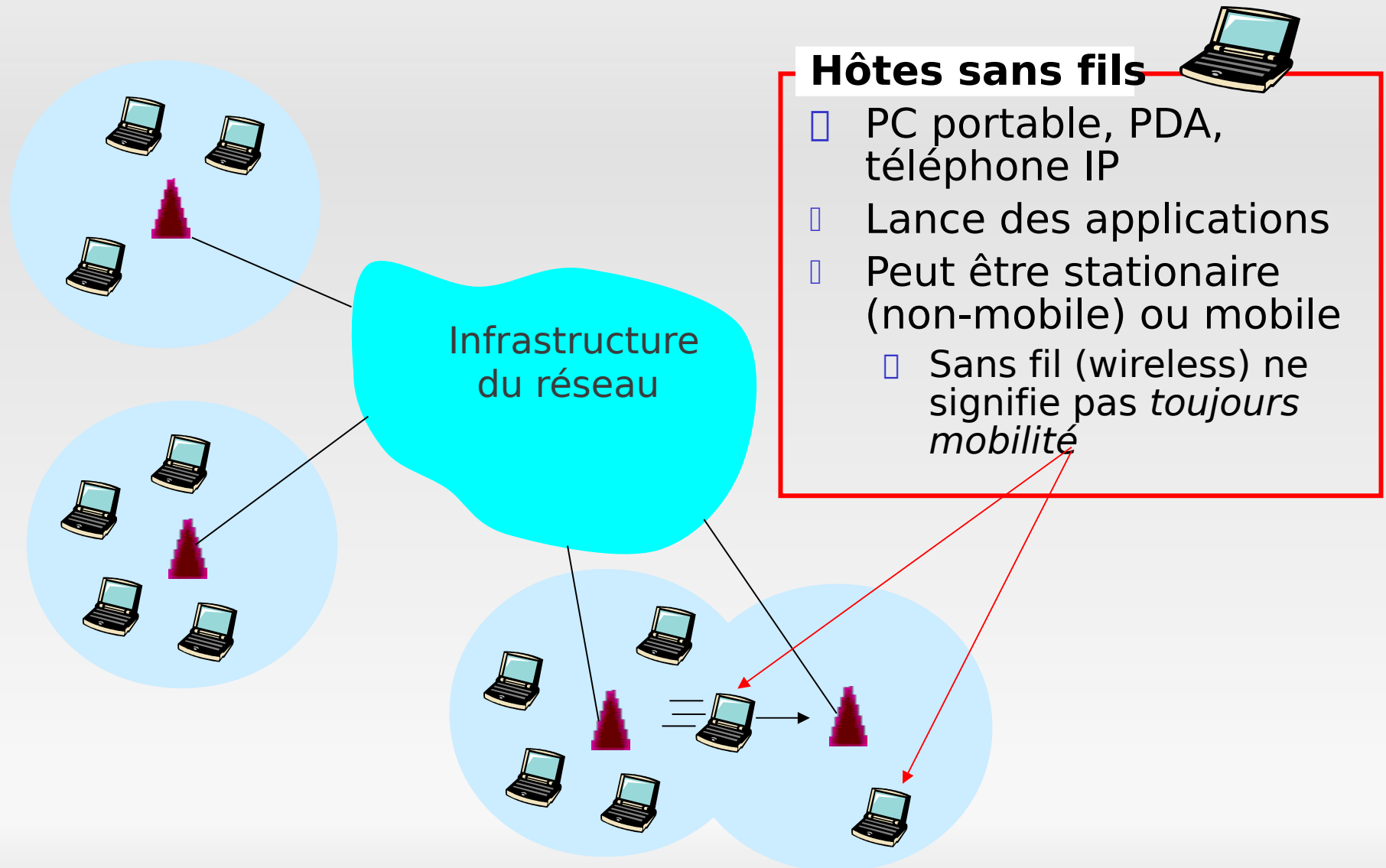
- 5.1 Introduction et services
- 5.2 Détection d'erreur et correction
- 5.3 Protocole d'accès multiple
- 5.4 Adressage de la couche liaison
- 5.5 Ethernet
 - Ethernet
 - Hubs et switches
- 5.6 Wifi
 - Liaison sans fil caractéristique
 - CDMA
 - IEEE 802.11 réseaux locaux (LANs) sans fil ("wi-fi")
 - Accès internet pour les cellulaires
 - architecture
 - standards (e.g., GSM)
- 5.7 Liaison point à point (PPP)

Sans fil (Wifi) et réseau mobile

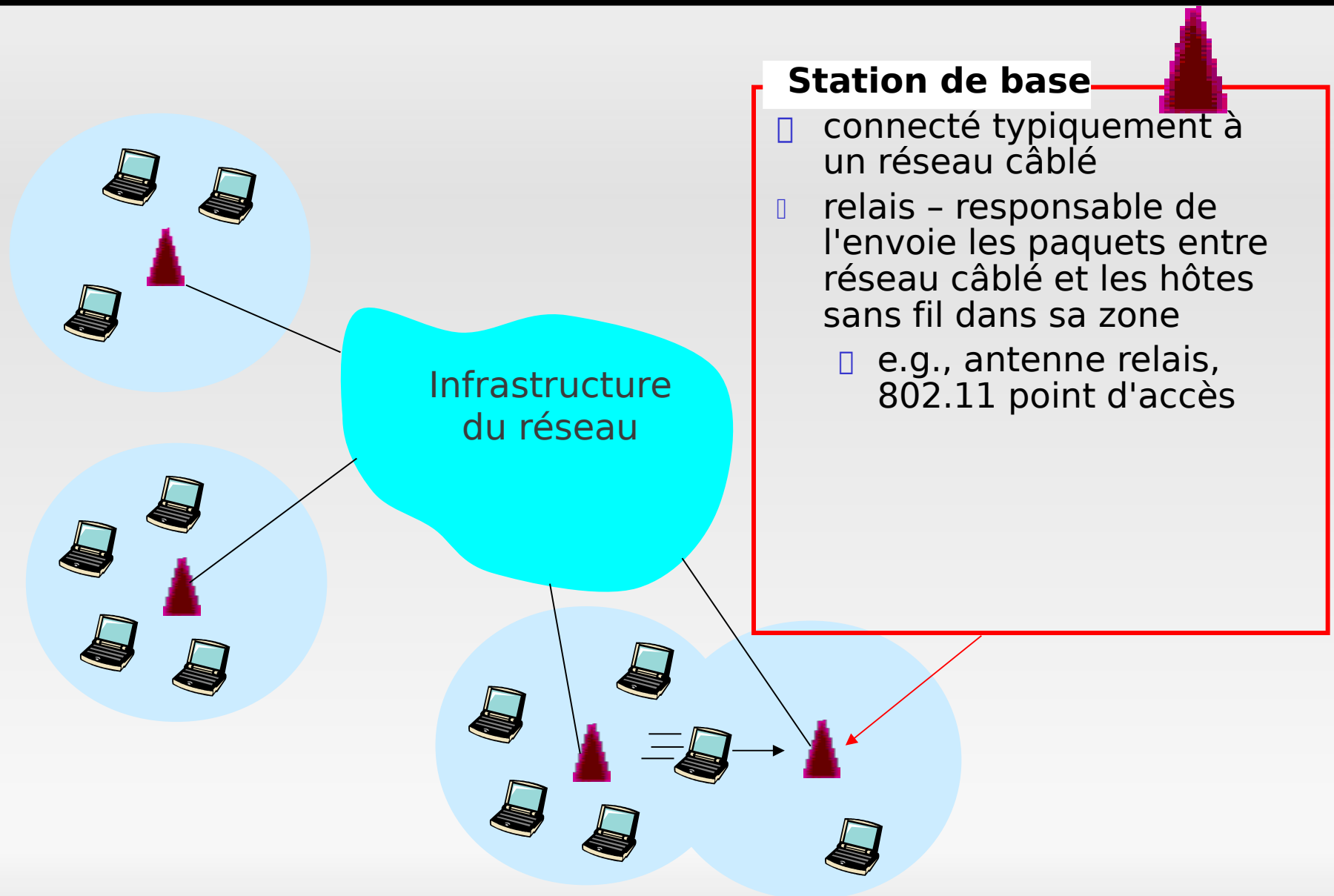
Contexte:

- Le nombre d'abonnés à un téléphone portable est maintenant supérieur au nombre d'abonnés à un téléphone fixe!
- Réseau d'ordinateur: pc portables, tablettes, téléphone internet nécessitent à tout moment un accès internet sans fil
- Deux challenges importants (mais différents)
 - Communication sur des liaisons sans fil
 - Gérer les utilisateurs mobile qui bougent d'un point d'attache à un autre point d'attache sur le réseau

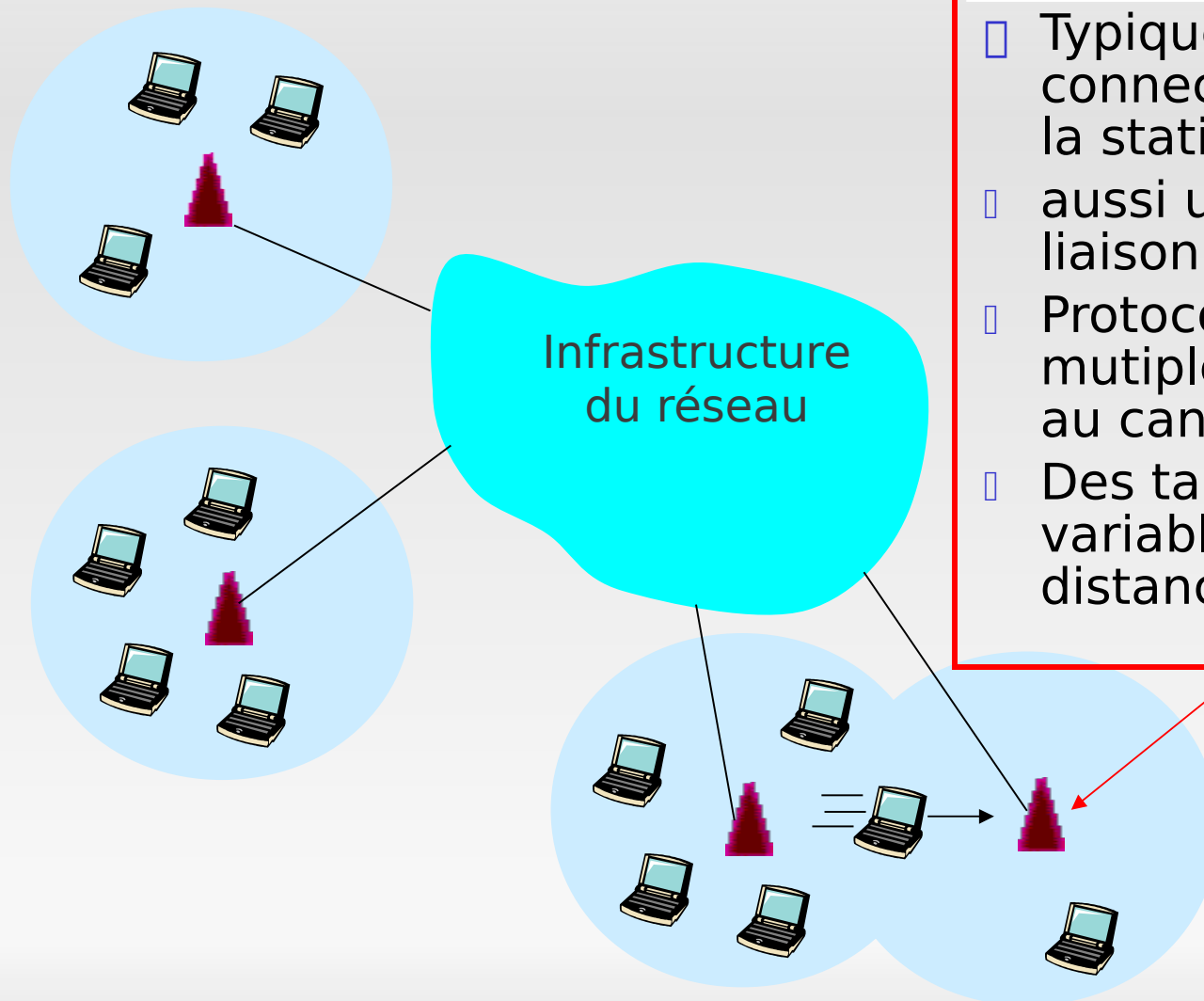
Éléments d'un réseau sans fil



Éléments d'un réseau sans fil



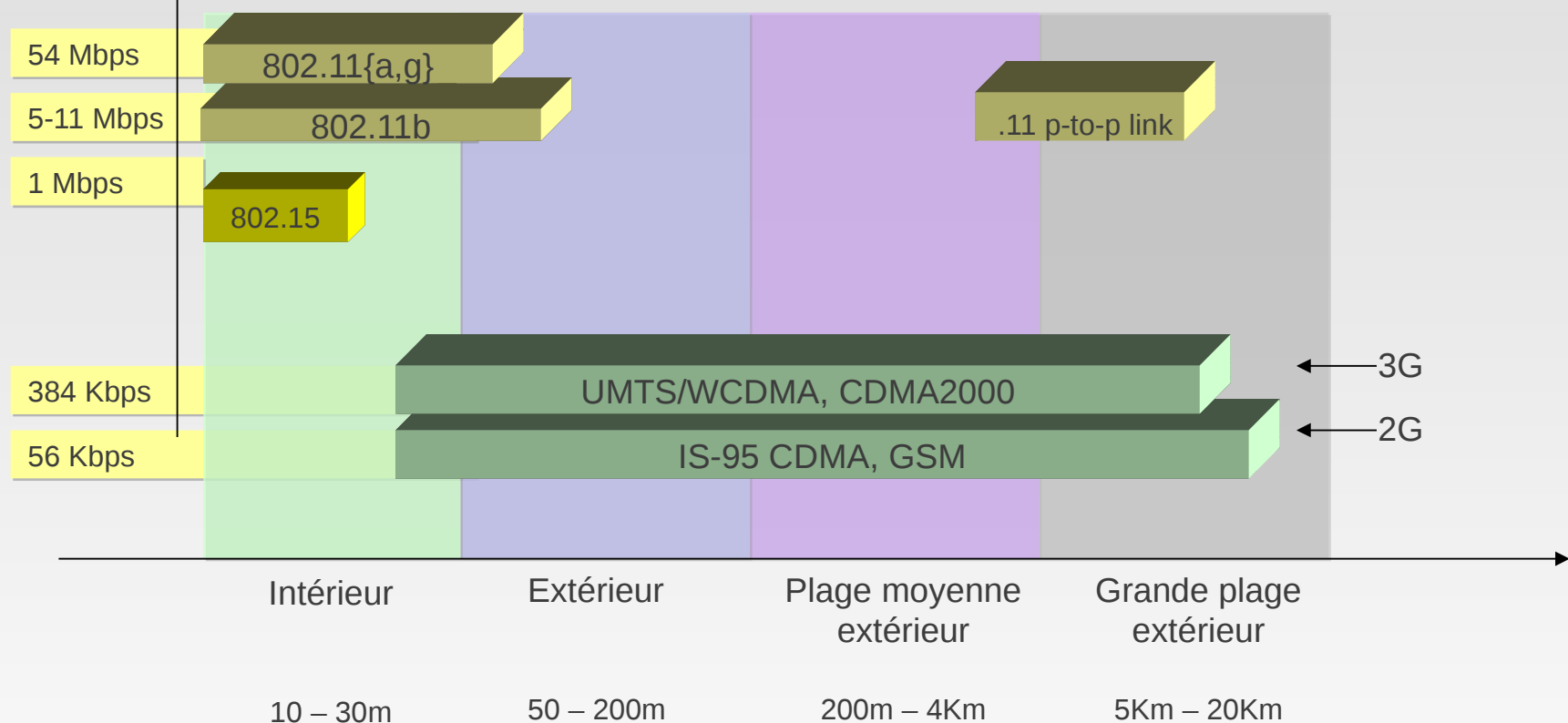
Éléments d'un réseau sans fil



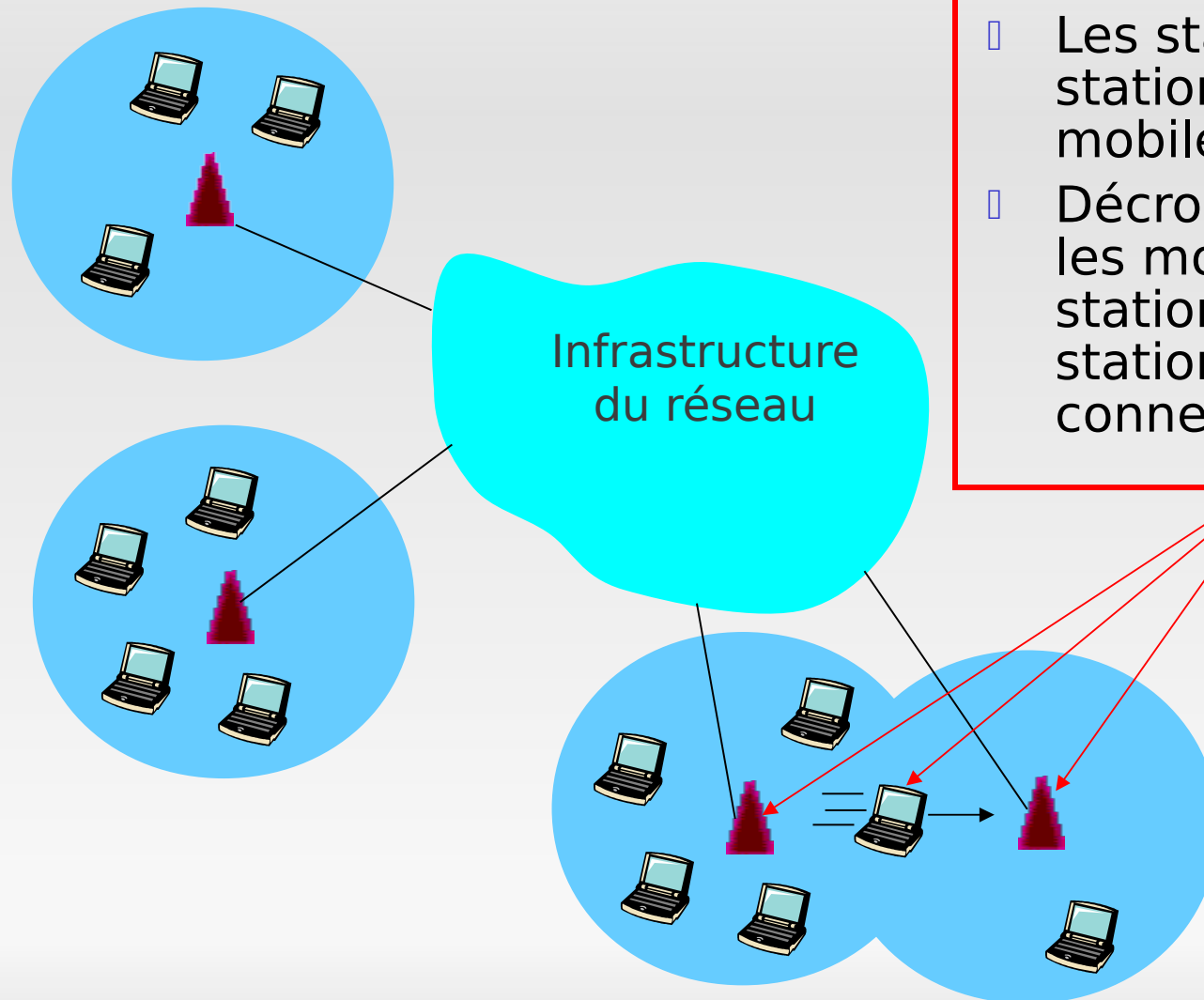
Liaison sans fil

- Typiquement utilisée pour connecter des mobiles à la station base
- aussi utilisé comme liaison dorsale
- Protocole à accès multiple coordonne l'accès au canal
- Des taux de transfert variables suivant la distance de transmission

Caractéristiques des liaisons dans les standards



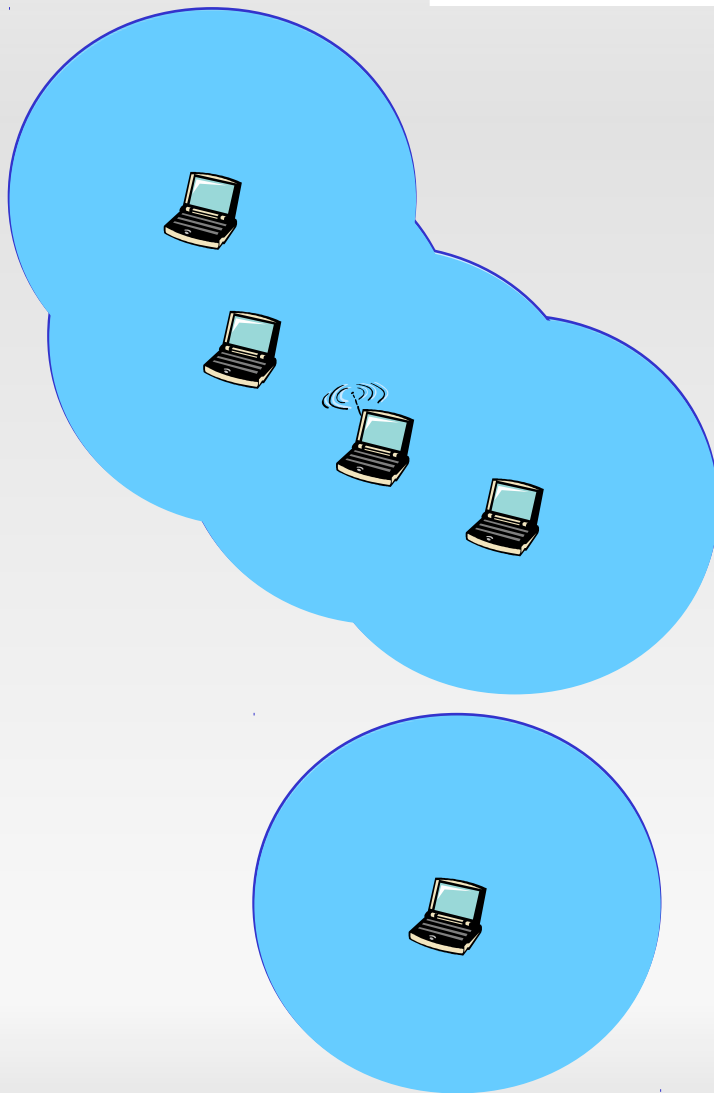
Éléments d'un réseau sans fil



Mode de l'infrastructure

- ▣ Les stations de base connecte les mobiles au réseau câblés
- ▣ Décrochage/réancrage: les mobiles changents de station de base, la station fournissant la connexion au réseau

Éléments d'un réseau sans fil



Mode ad hoc

- Sans stations de base
- Les noeuds peuvent seulement transmettre aux autres noeuds sur le domaine couvert
- Les noeuds s'organisent eux même en réseau: ils se routent parmi eux même

Chapitre 5: La couche liaison

- 5.1 Introduction et services
- 5.2 Détection d'erreur et correction
- 5.3 Protocole d'accès multiple
- 5.4 Adressage de la couche liaison
- 5.5 Ethernet
 - Ethernet
 - Hubs et ponts
- 5.6 Wifi
 - Liaison sans fil caractéristique
 - CDMA
 - IEEE 802.11 réseaux locaux (LANs) sans fil (“wi-fi”)
 - Accès internet pour les cellulaires
 - architecture
 - standards (e.g., GSM)
- 5.7 Liaison point à point (PPP)

Caractéristiques des réseaux sans fils

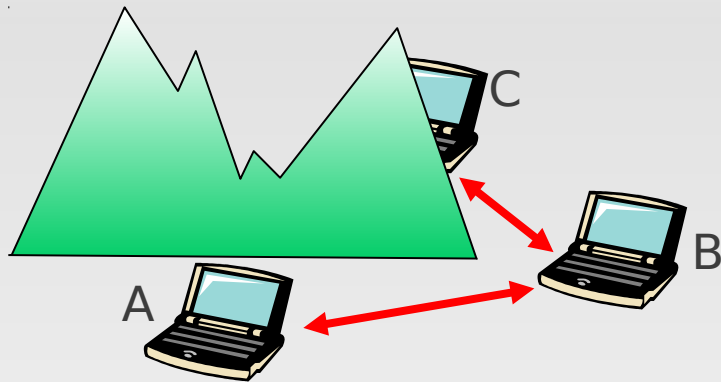
Différents des réseaux câblés

- **Décroissance de la force du signal:** les signaux radios s'atténuent lorsqu'ils se propagent à travers la matière (path loss)
- **Interférence avec d'autres sources:** les fréquences des réseaux sans fil standardisés (e.g., 2.4 GHz) peuvent être partagés par d'autres appareils (e.g., téléphone); des appareils comme les moteurs interfèrent aussi
- **Propagation dans plusieurs directions:** les signaux radio se réfléchissent sur des objets et arrivent à destination à des moments légèrement différents

.... crée des difficultés à communiquer sur une liaison sans fils
(même point à point)

Caractéristiques des réseaux sans fils

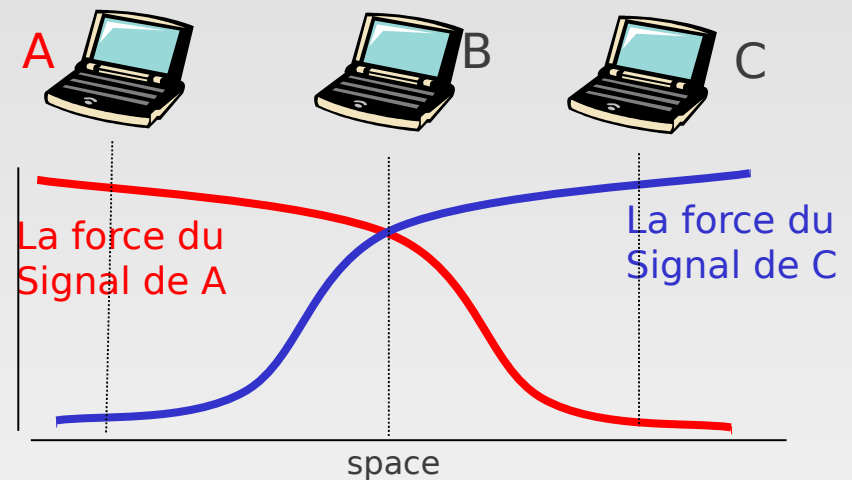
De multiple expéditeurs et destinataire sans fils créent des problèmes supplémentaires (au delà de l'accès multiple):



Le problème du terminal caché

- B, A peuvent s'entendre l'un l'autre
- B, C peuvent s'entendre l'un l'autre
- A, C ne peuvent pas s'entendre l'un l'autre

Cela signifie que A et C ne sont pas au courant que leur communication avec B s'interfèrent



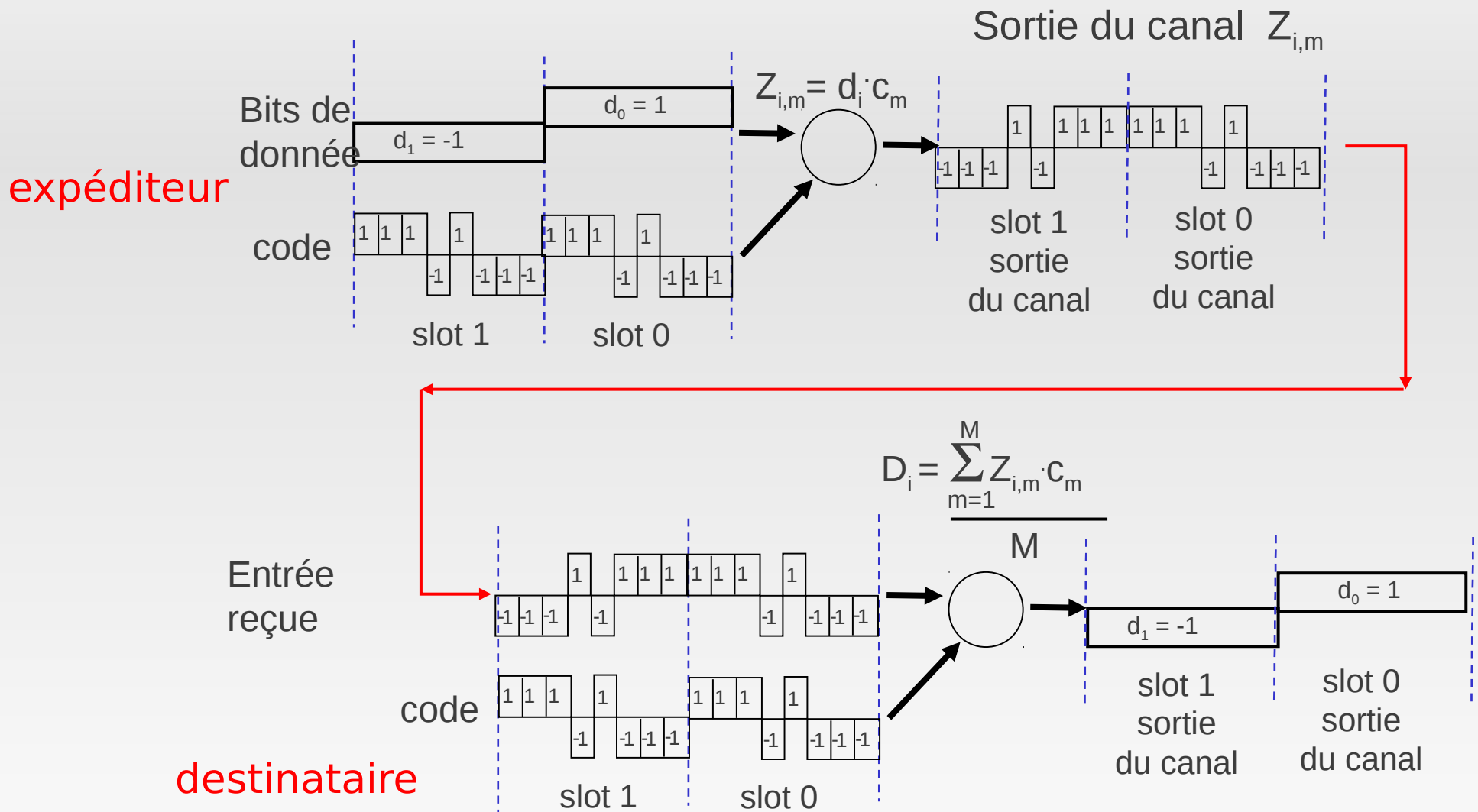
Affaiblissement du signal:

- B, A peuvent s'entendre l'un l'autre
- B, C peuvent s'entendre l'un l'autre
- A, C ne peuvent s'entendre interférer avec B

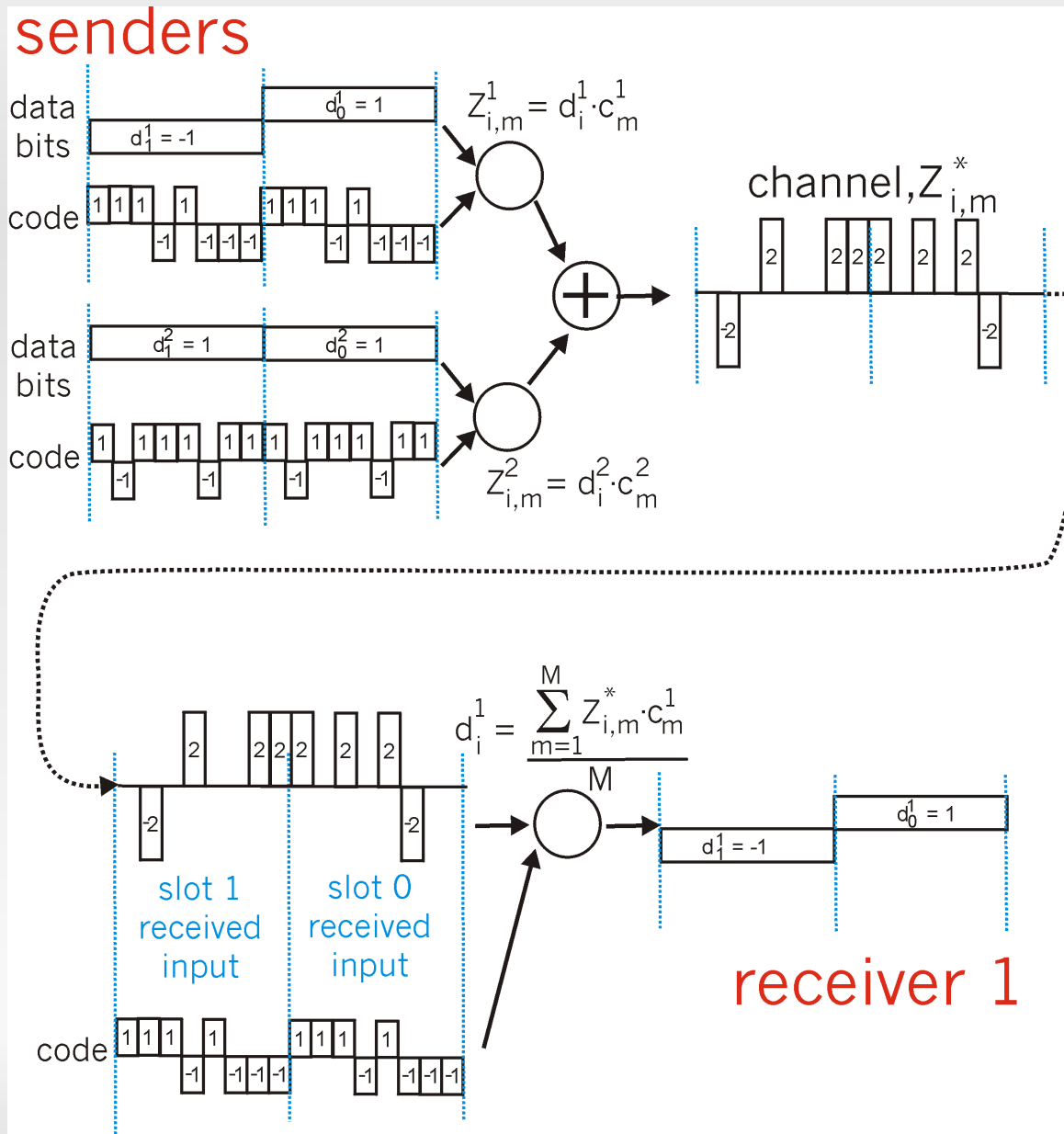
Code Division Multiple Access (CDMA)

- Utilisé dans plusieurs canaux sans fils à diffusion (cellular, satellite, etc)
- Un “code” unique assigné à chaque utilisateur; i.e., un ensemble de code de partitionnement
- Tous les utilisateurs partagent la même fréquence, mais chaque utilisateur a sa propre séquence de codage pour encoder des données
- *signal encodé* = (donnée d'origine) x (séquence de codage)
- *décodage*: produit scalaire du signal encodé avec la séquence de codage
- Permet à de multiples utilisateurs de coexister et de transmettre simultanément avec une interférence minimale (si les codes sont “orthogonaux”)

CDMA Encodage/Décodage



CDMA: interférence de deux expéditeurs



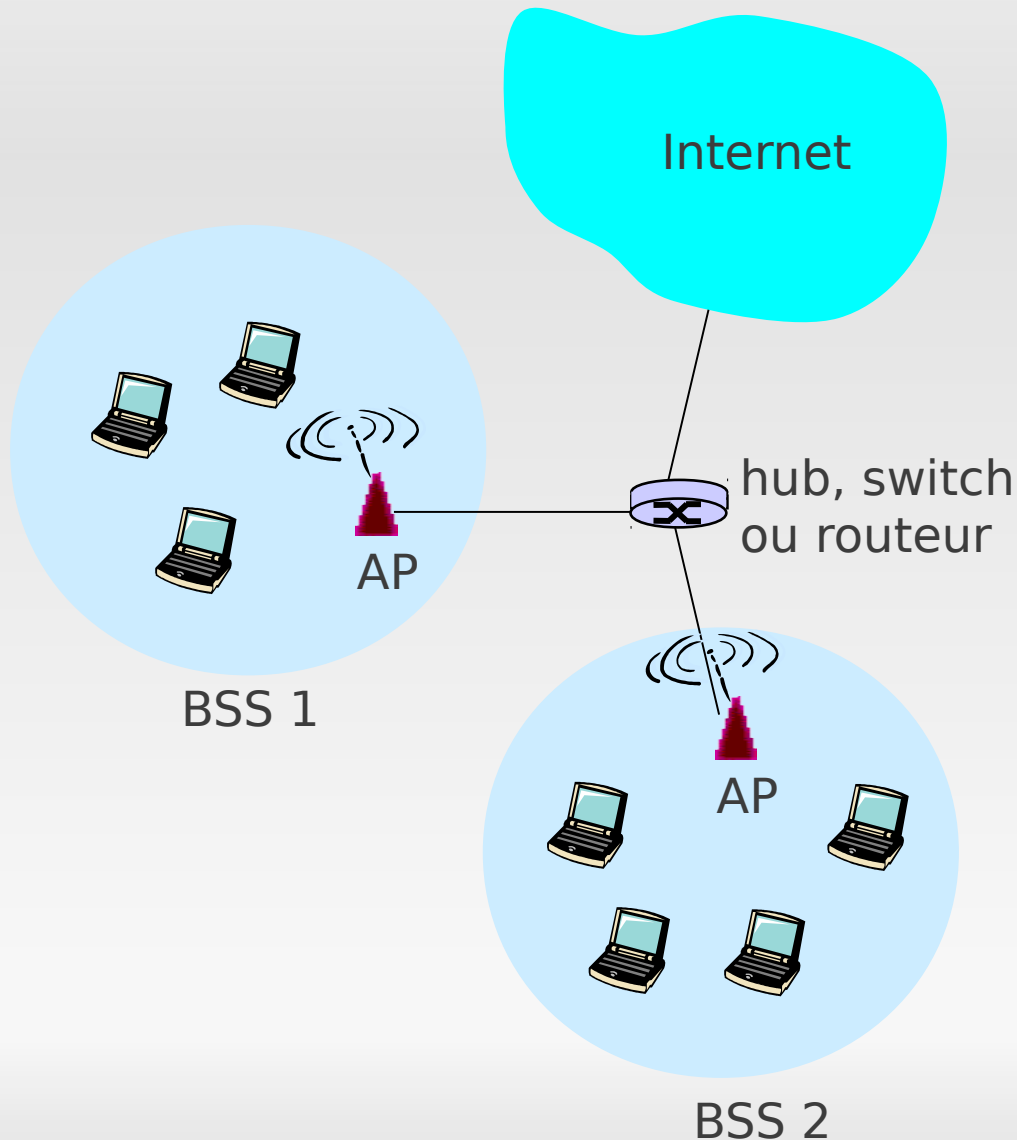
Chapitre 5: La couche liaison

- 5.1 Introduction et services
- 5.2 Détection d'erreur et correction
- 5.3 Protocole d'accès multiple
- 5.4 Adressage de la couche liaison
- 5.5 Ethernet
 - Ethernet
 - Hubs et ponts
- 5.6 Wifi
 - Liaison sans fil caractéristique
 - CDMA
 - IEEE 802.11 réseaux locaux (LANs) sans fil (“wi-fi”)
 - Accès internet pour les cellulaires
 - architecture
 - standards (e.g., GSM)
- 5.7 Liaison point à point (PPP)

IEEE 802.11 Wireless LAN

- **802.11b**
 - 2.4-5 GHz spectre radio qui n'est pas sous licence
 - Jusqu'à 11 Mbps
 - direct sequence spread spectrum (DSSS) dans le média physique
 - Tous les hôtes utilisent le même code de transition
 - Largement déployé, utilisent des stations de base
- **802.11a**
 - Plage 5-6 GHz
 - Jusqu'à 54 Mbps
- **802.11g**
 - Plage 2.4-5 GHz
 - Jusqu'à 54 Mbps
- Tous utilisent CSMA/CA pour l'accès multiple au canal
- Tous ont une version avec station base et une version réseau ad-hoc

Architecture LAN 802.11



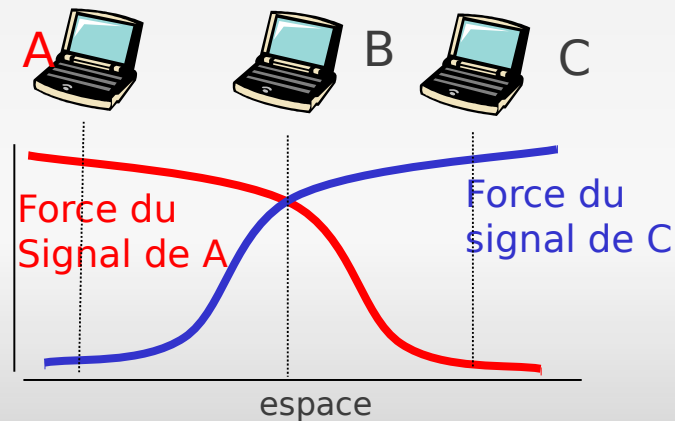
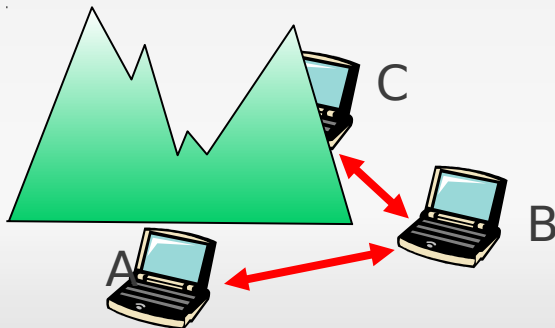
- Hôte sans fil communiquent avec la station base
 - **Station base = point d'accès (AP)**
- **Basic Service Set (BSS)** (aussi connu sous le nom de "cellule") dans une infrastructure contient:
 - des hôtes sans fils
 - Un point d'accès (AP): station de base
 - En mode ad hoc: uniquement des hôtes

802.11: Canaux, association

- 802.11b: 2.4GHz-2.485GHz spectre divisé en 11 canaux de fréquence différente
 - L'administrateur de l'AP choisit la fréquence pour l'AP
 - Interférence possible: le canal peut être le même que celui choisi par les voisins de l'AP!
- hôte: doit *s'associer* avec un AP
 - scan des canaux, écoute pour des *trames jeton* (beacon frames) contenant le nom de l'AP's (SSID) et son adresse MAC
 - Selectionne un AP avec lequel s'associer
 - Peut nécessiter une authentification
 - Utilisera en général ensuite DHCP pour obtenir une adresse IP dans le sous-réseau de l'AP

IEEE 802.11: accès multiple

- **But**, éviter les collisions de 2 noeuds transmettant en même temps
- 802.11: CSMA – vérification que le canal est libre avec une transmission
 - Ne pas entrer en collision avec une transmission en cours provenant d'un autre noeud
- 802.11: *pas de détection* de collision!
 - Difficulté à recevoir (détecteur des collisions) lorsque la transmission a signal faible (affaiblissement)
 - Ne peut pas toujours détecter toutes les collisions: terminaux cachés, affaiblissement
 - But *éviter des collisions*: CSMA/C(ollision)A(voidance)



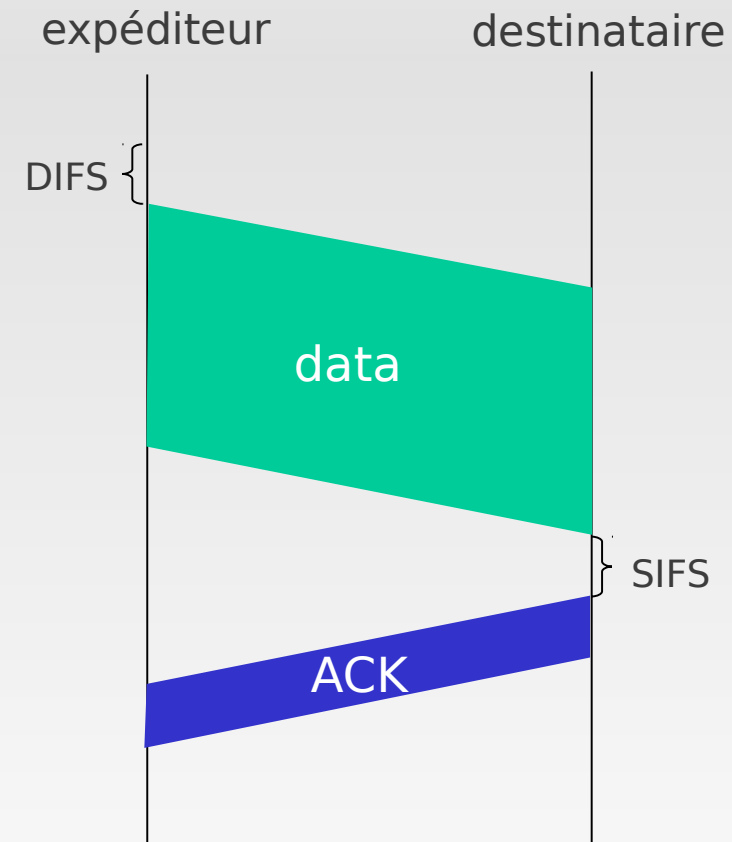
IEEE 802.11, Protocole MAC: CSMA/CA

802.11 expéditeur

1. Si il sent que le canal est disponible pour **DIFS** alors
transmettre la trame en entier (pas de CD, i.e., de détection de collision)
2. Si il sent que le canal est occupé alors
démarrer une attente avec un temps aléatoire
Décompte du temps pendant que le canal est libre
transmettre lorsque le décompte se termine
Si aucun ACK reçu, augmenter l'intervalle du temps d'attente aléatoire et retourner à 2.

802.11 destinataire

- Si la trame est reçue en bon état
renvoit un ACK après **SIFS** (ACK est nécessaire dû au problème du terminal caché)

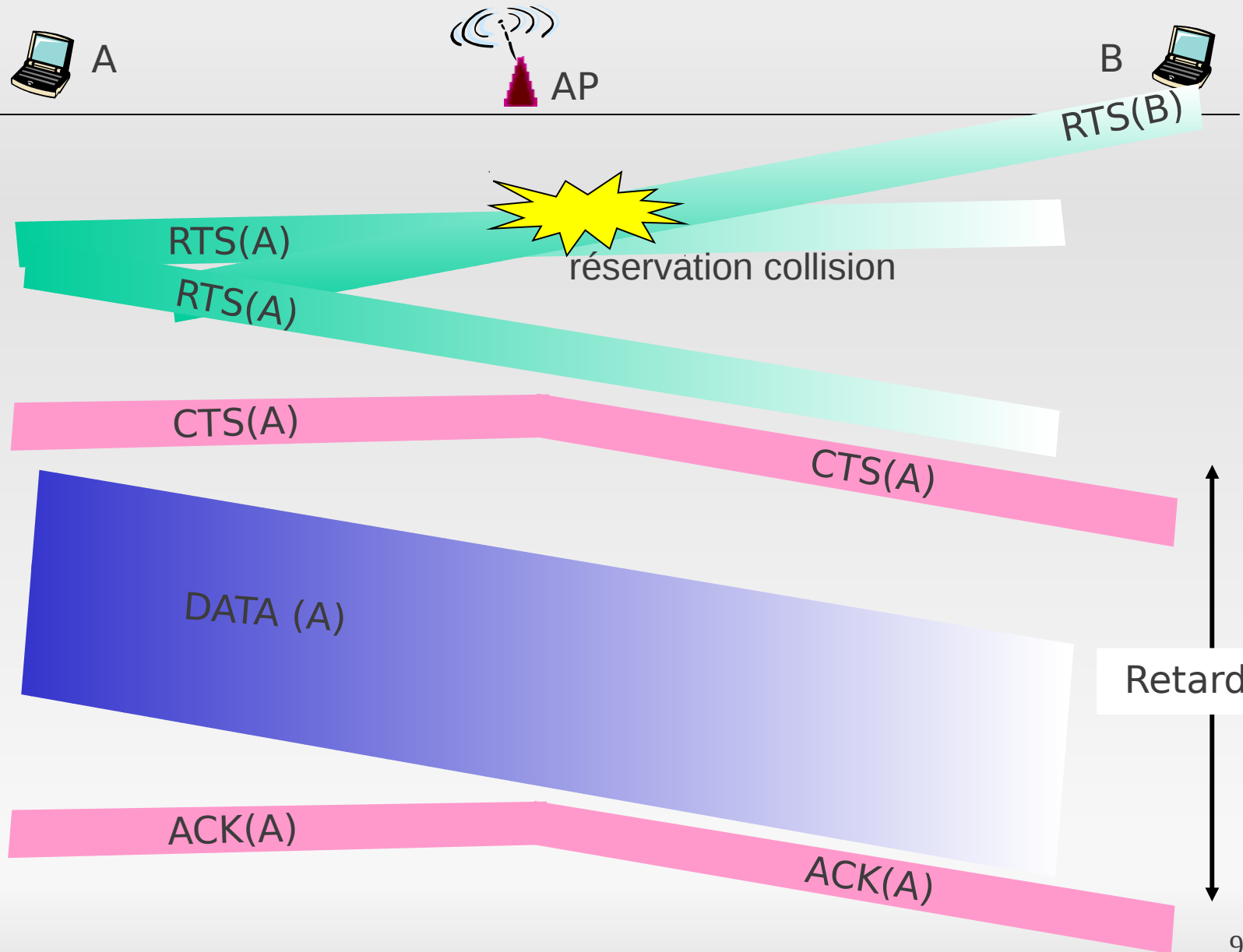


Eviter des collisions (cont.)

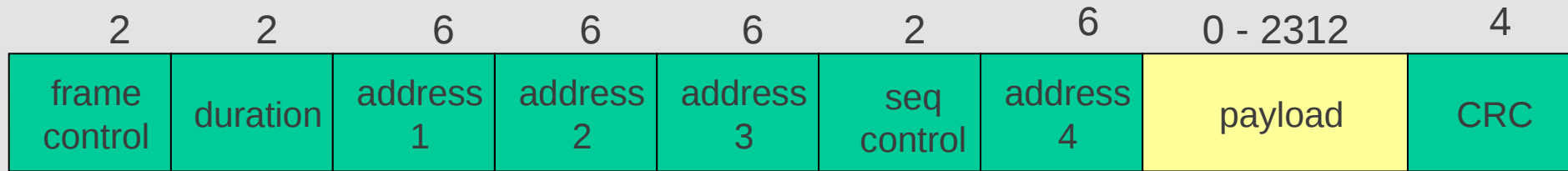
- Idée:* permettre à l'expéditeur de “réserver” le canal plutôt que d'y accéder par accès aléatoire: éviter les collisions de longues trames
- expéditeur transmet d'abord de *petit paquet requête-à-l'expéditeur* (RTS -Request to sender) à la station base (BS) en utilisant CSMA
 - RTSs peut encore entrer en collision avec d'autres paquets (mais ils sont courts)
 - BS diffuse un CTS signifiant un prêt-à-l'envoie en réponse au RTS
 - Le RTS est entendu par tous les noeuds!
 - L'expéditeur transmet alors une trame de données
 - Les autres stations remettent à plus tard leur transmissions

Morale: éviter les collisions de trame de données en utilisant de petit paquets de réservation!

Evitement de collision : échange RTS-CTS



Trame 802.11 : adressage



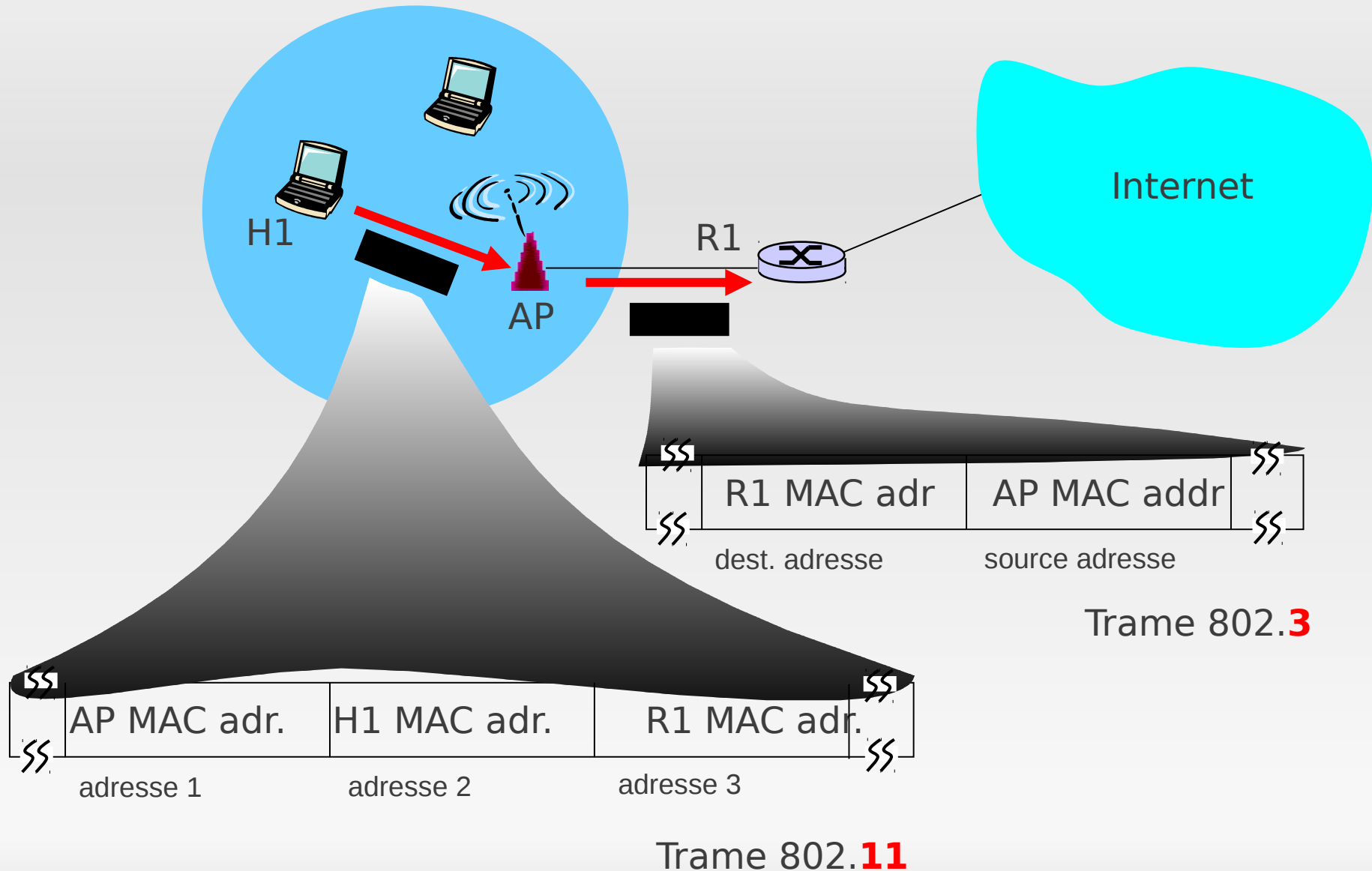
Adresse 1: L'adresse MAC de l'hôte sans fil ou AP à qui est destinée cette trame

Adresse 2: adresse MAC de l'hôte sans fil ou AP qui transmet cette trame

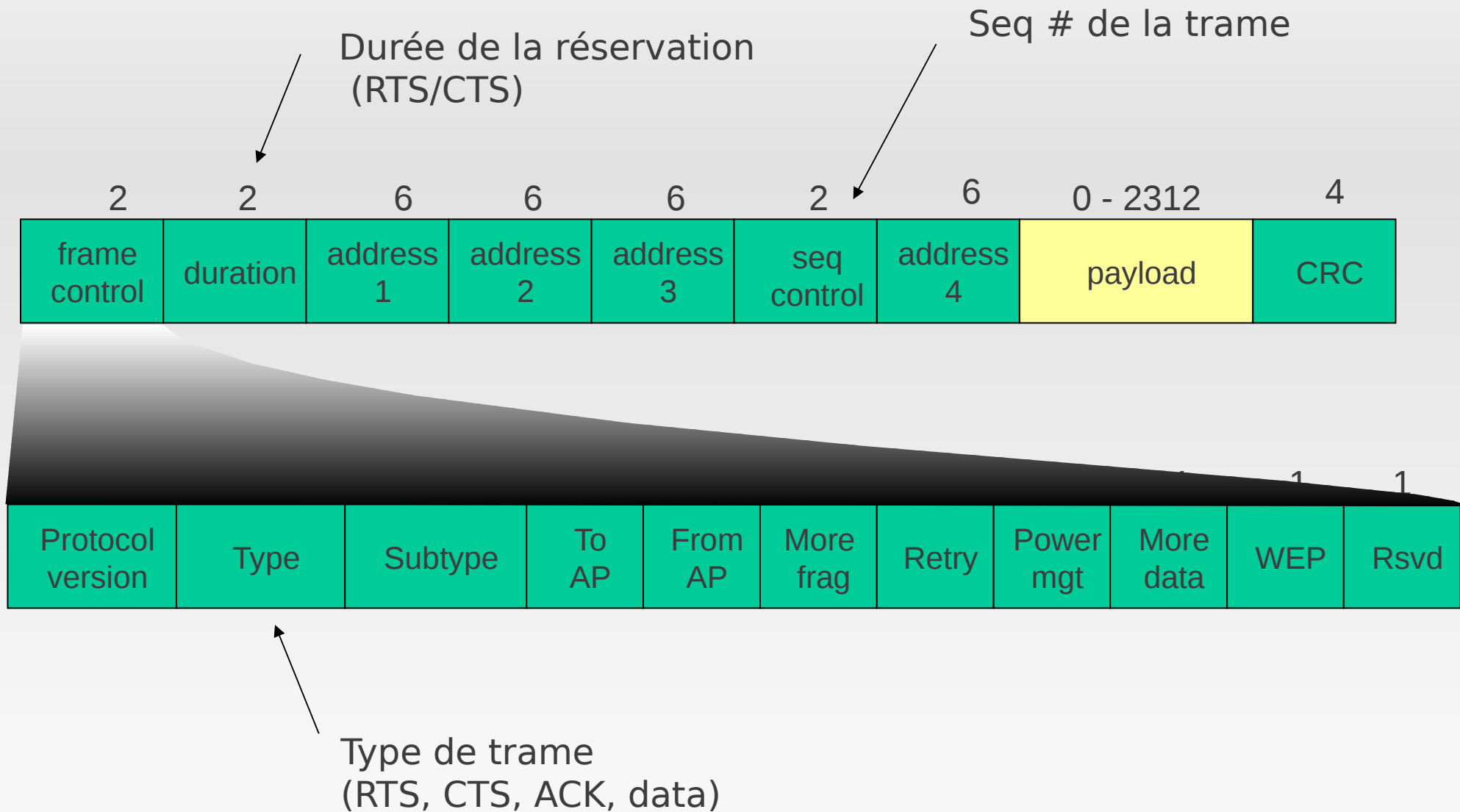
Adresse 3: adresse MAC de l'interface du routeur à qui l'AP est attachée

Adresse 4: utilisée seulement en mode ad hoc

Trame 802.11: adressage

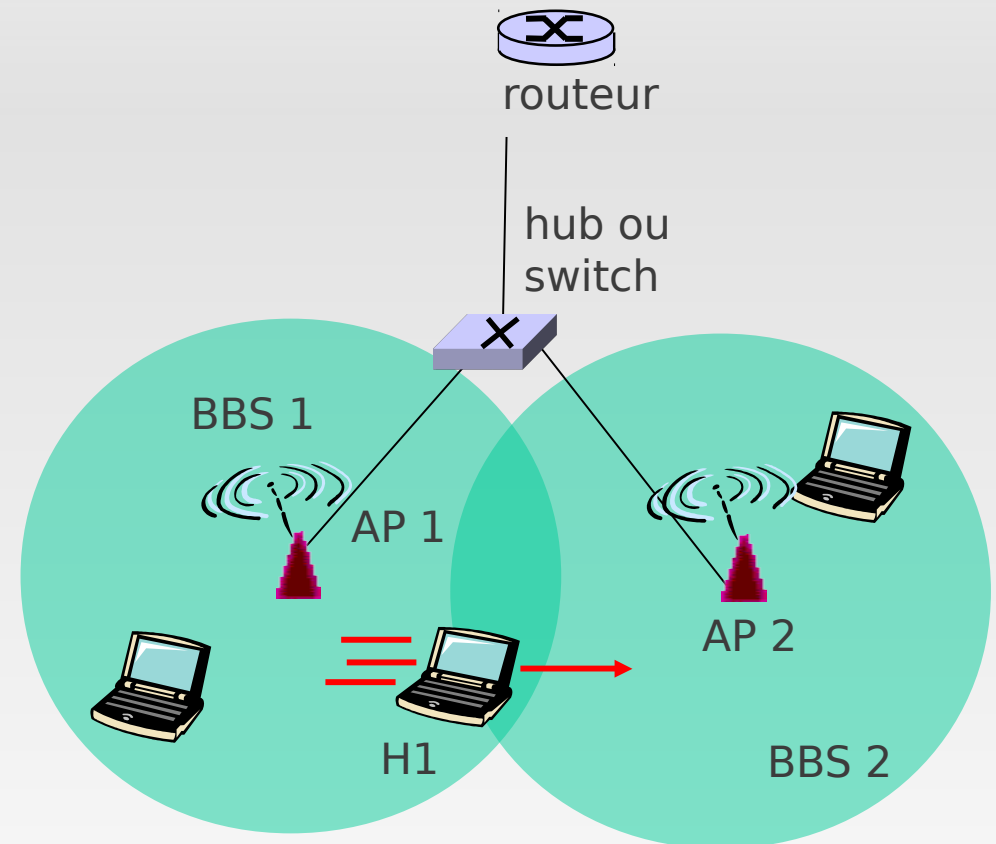


Trame 802.11: suite



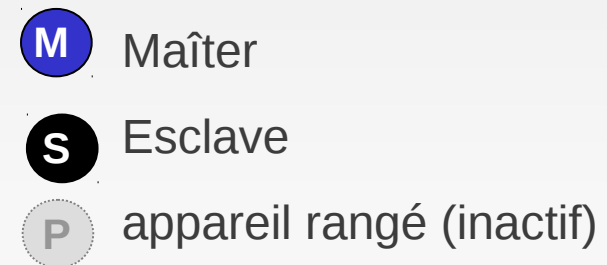
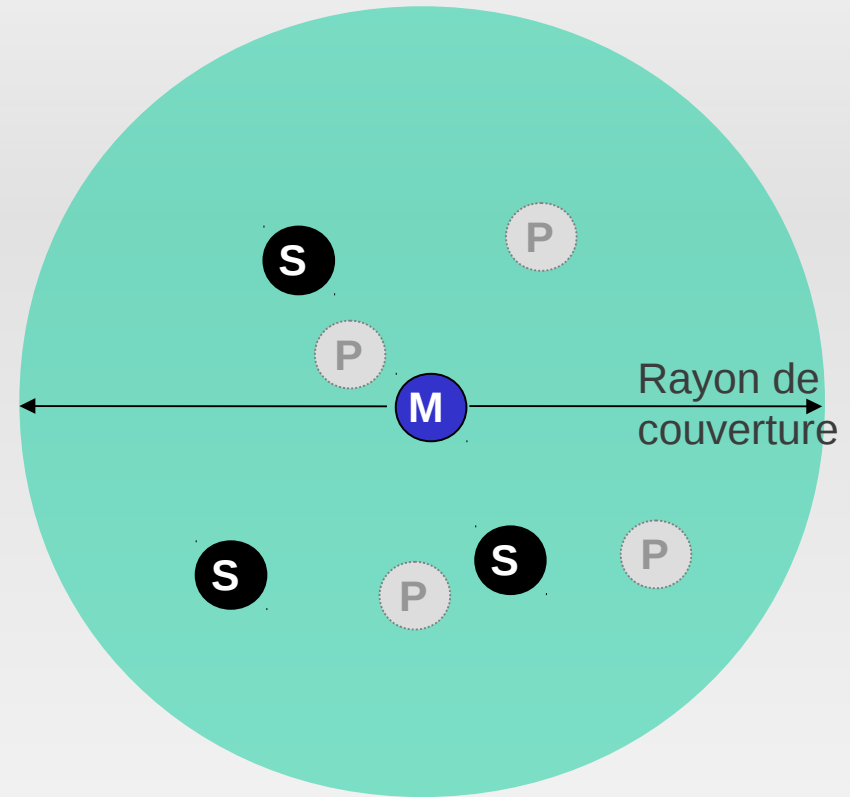
802.11: Mobilité dans le même sous réseau

- H1 reste dans le même sous réseau IP:
l'adresse IP peut rester la même
- Pont (switch): quelle AP est associée avec H1?
 - auto-apprentissage : le switch verra la trame venant de H1 et se souviendra de quel port du switch peut être utilisé pour accéder à H1



802.15: zone réseau personnelle

- Moins de 10m de diamètre
- Remplace les câbles (souris, clavier, écouteur)
- ad hoc: pas d'infrastructure
- maître/esclaves:
 - Les esclaves requêtent une permission pour envoyer (au maître)
 - Le maître accède (ou non) à la requête
- 802.15: hérite des spécifications Bluetooth
 - 2.4-2.5 GHz bande passante radio
 - Jusqu'à 721 kbps



Chapitre 5: La couche liaison

- 5.1 Introduction et services
- 5.2 Détection d'erreur et correction
- 5.3 Protocole d'accès multiple
- 5.4 Adressage de la couche liaison
- 5.5 Ethernet
 - Ethernet
 - Hubs et switches
- 5.6 Wifi
 - Liaison sans fil caractéristique
 - CDMA
 - IEEE 802.11 réseaux locaux (LANs) sans fil (“wi-fi”)
 - Accès internet pour les cellulaires
 - architecture
 - standards (e.g., GSM)
- 5.7 Liaison point à point (PPP)

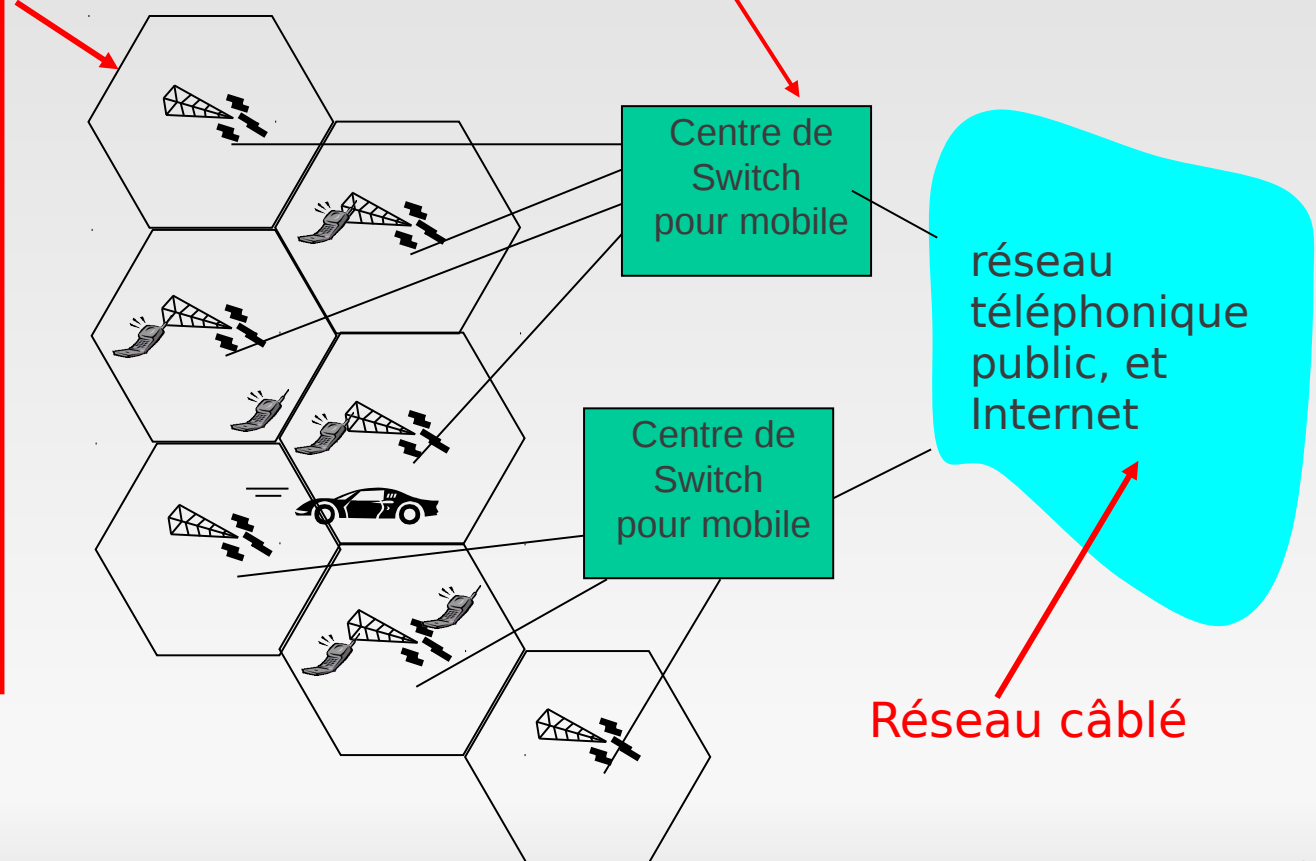
Composants d'une architecture réseau pour cellulaire

cellule

- ▣ Couvre une zone géographique
- ▣ *Station d base* (BS) analogue à AP de 802.11 AP
- ▣ *Utilisateurs mobiles* attachés à un réseau via BS
- ▣ *air-interface*: protocole de couche physique et liaison entre le mobile et BS

MSC

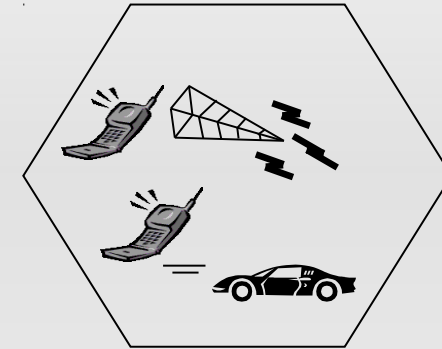
- ▣ Connecte les cellules à une large zone du net
- ▣ Gère l'établissement des appels (on verra ça plus tard!)
- ▣ Gère la mobilité (on verra ça plus tard!)



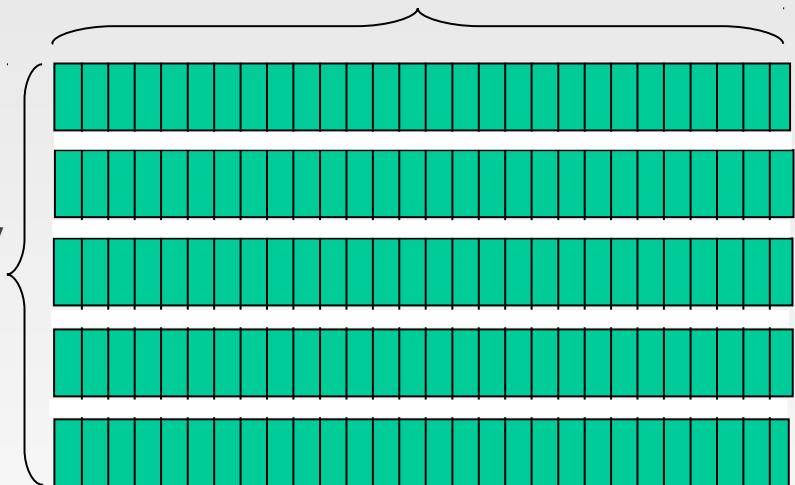
Réseau de cellulaires: le premier saut (hop)

Deux techniques pour partager le spectre radio mobile-BS

- **Combinaison de FDMA/TDMA:** divise le spectre en canaux (bande plus réduite de fréquence), divise chaque canaux en slot de temps
- **CDMA:** utilisation de division de code division pour accès multiple



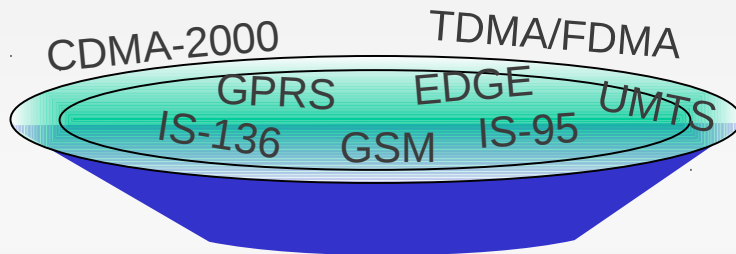
time slots



Standards des cellulaires: courte présentation

2G systems: canaux pour la voix

- IS-136 TDMA: combine FDMA et TDMA (amerique du nord)
- GSM (global system for mobile communications): combine FDMA/TDMA
 - Déployé plus largement
- IS-95 CDMA: utilise des codes pour l'accès multiple



Ne vous noyez pas dans un verre rempli de ce jargon d'acronyme. Utiliser des références pauvre seulement

Standards des cellulaires: courte présentation

2.5 G systems: canaux à voix et à donnée

- Pour ceux qui n'en peuvent plus d'attendre pour les services 3G: extension de 2G
- Général paquet radio service (**GPRS**)
 - Descendant du GSM
 - Donnée envoyé sur plusieurs canaux (si disponibles)
- Enhanced data rates for global evolution (**EDGE**)
 - C'est aussi un héritier de GSM, qui utilise des modulations améliorées (enhanced)
 - Débit jusqu'à 384K
- **CDMA-2000** (phase 1)
 - Débit jusqu'à 144K
 - Héritier de l'IS-95

Standards des Cellulaires: courte présentation

3G systems: voix et données

- Universal Mobile Telecommunications Service (UMTS)
 - prochaine étape de GSM, mais utilisant CDMA
- CDMA-2000

..... plus d'info (aussi plus intéressante) sur le sujet des cellulaires à propos de la mobilité, plus tard ...

Chapitre 5: La couche liaison

- 5.1 Introduction et services
- 5.2 Détection d'erreur et correction
- 5.3 Protocole d'accès multiple
- 5.4 Adressage de la couche liaison
- 5.5 Ethernet
 - Ethernet
 - Hubs et switches
- 5.6 Wifi
 - Liaison sans fil caractéristique
 - CDMA
 - IEEE 802.11 réseaux locaux (LANs) sans fil (“wi-fi”)
 - Accès internet pour les cellulaires
 - architecture
 - standards (e.g., GSM)
- 5.7 Liaison point à point (PPP)

Liaison de contrôle de donnée

Point à Point

- Un expéditeur, un destinataire, une liaison: plus facile que des liaisons à diffusion:
 - Pas de MAC (Media Access Control)
 - Pas de nécessité d'un adressage MAC explicite
 - e.g., liaison bas débit, ligne ISDN
- Les protocoles point-à-point DLC:
 - PPP (protocole point-à-point)
 - HDLC: High level data link control (La couche liaison de données généralement considérée comme une couche haute dans la pile de protocole!)

Cahier des charges de PPP [RFC 1557]

- **Tramage des paquets:** encapsulation des datagrammes réseau dans la trame de liaison de donnée
 - Transporte des données de la couche réseau de n'importe quel protocole de couche réseau (pas uniquement IP) en même temps
 - Peut démultiplexer vers le haut
- **Transparance au niveau du bit:** doit transporter n'importe quel motif de bit dans le champs de donnée de la trame
- **Détection d'erreur** (mais pas de correction)
- **Etat de la connection:** détecte, et signale une défaillance du lien a la couche réseau
- **négotiation d'adresse réseau:** les deux participants à la connection peut apprendre/configurer l'adresse réseau de l'autre

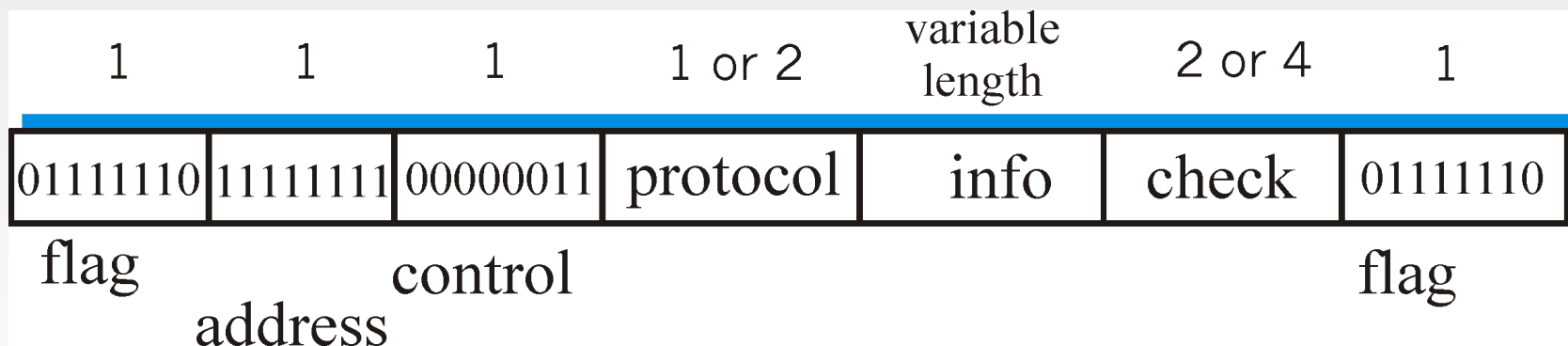
Ce qui n'est pas dans le cahier des charge de PPP

- Pas de correction d'erreur/réparation
- Pas de contrôle flux
- Livraison dans le désordre OK
- Pas besoin de supporter des liens à plusieurs (e.g., urne)

Correction d'erreur, contrôle de flux, livraison dans l'ordre, sont délégués aux couches supérieures!

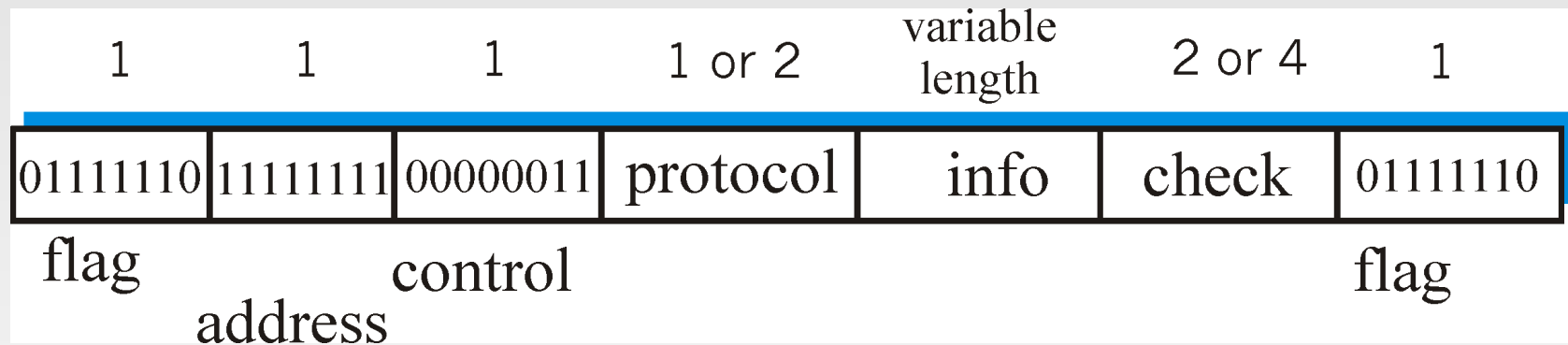
Trame de données PPP

- **Flag:** délimiteur (tramage)
- **Adresse:** ne fait rien (seulement en option)
- **Contrôle:** ne fait rien; dans le futur possible champs de contrôle de multiple connections
- **Protocole:** le protocole de couche supérieure auquel les trames sont délivrées (e.g., PPP-LCP, IP, IPCP, etc.)



Structure des trames PPP

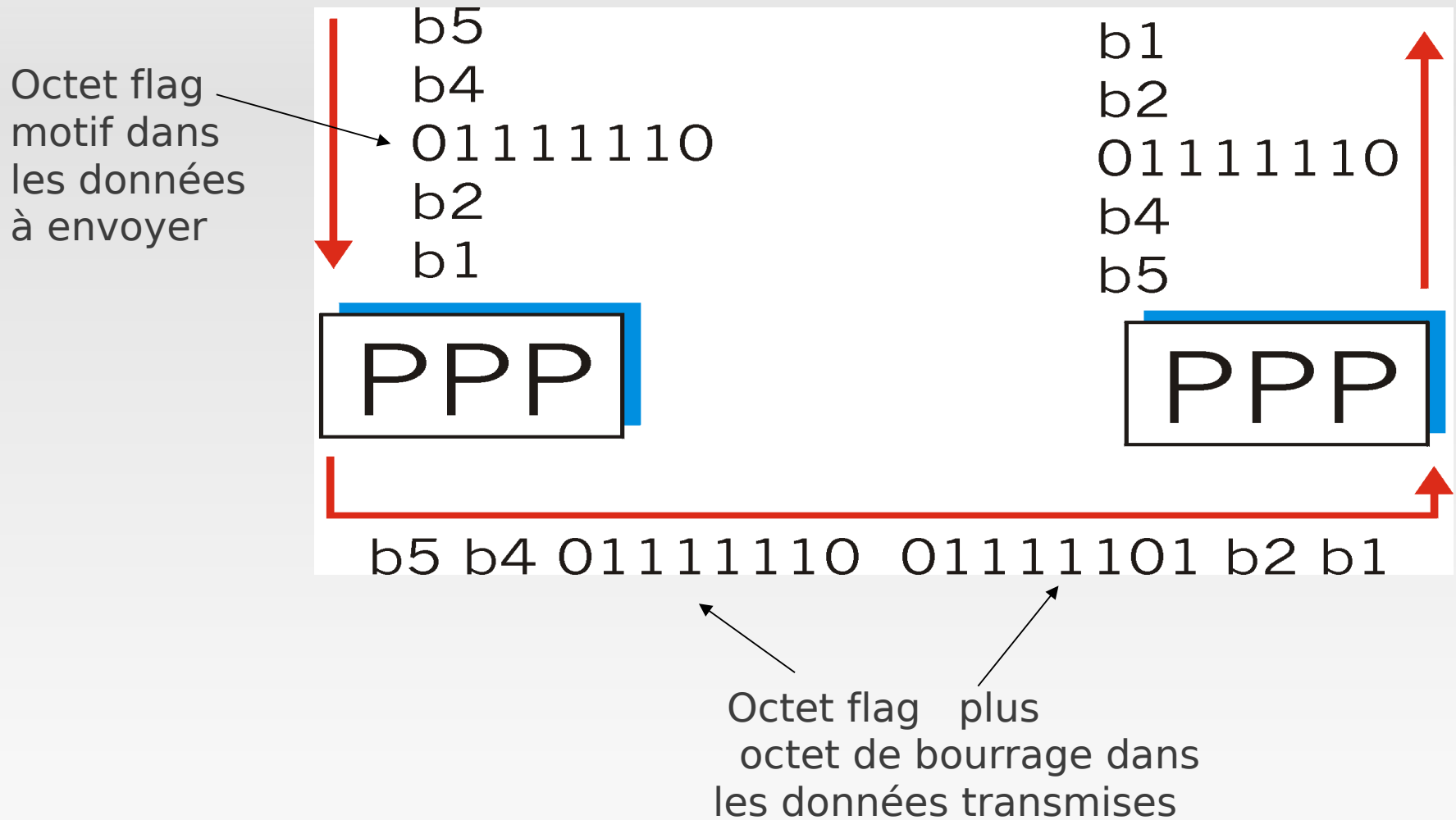
- **info:** les données de la couche supérieure qui sont transportées
- **check:** CRC pour la détection d'erreur



Bourrage d'octet

- “la transparence de donnée” requise: le champs de donnée doit être allouée pour inclure le motif flag <01111110>
 - Q: est reçu <01111110> donnée ou drapeau?
- **Expéditeur**: ajoute (“bourrage”) des < 01111110> octets supplémentaires après chaque octet de *donnée* < 01111110>
- **Destinataire**:
 - Deux octets 01111110 à la suite: supprimer le premier octet, et continuer la réception des données
 - Un simple octet 01111110: octet “flag”

Bouillage d'octet



Protocole de contrôle de données PPP

Avant l'échange de donnée au niveau réseau, la liaison entre les pairs doit:

- **Configurer la liaison PPP**
(longueur maximale d'une trame, authentification)
- **apprendre/configurer des informations de la couche réseau**
 - Pour IP: transporte des msgs IP Control Protocol (IPCP)
(champs de protocole: 8021)
pour configurer ou apprendre une adresse IP

